



Optimalizace 3D tiskárny

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T049 – Výrobní systémy a procesy
Autor práce: **Bc. Zuzana Šolcová**
Vedoucí práce: Ing. Petr Keller, Ph.D.



Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zuzana Šolcová**

Osobní číslo: **S15000324**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní systémy a procesy**

Název tématu: **Optimalizace 3D tiskárny**

Zadávací katedra: **Katedra výrobních systémů a automatizace**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je provést rozbor stávajícího stavu konstrukce 3D tiskárny pro aditivní technologii FDM a navrhnout úpravy konstrukce a řízení této tiskárny pro umožnění 3D tisku z dostupných materiálů.

Body vypracování:

1. Seznamte se se stávajícím stavem konstrukce 3D tiskárny pro aditivní technologii FDM.
2. Na základě tohoto rozboru a poznatků z literatury optimalizujte konstrukci tiskové hlavy pro minimálně dva materiály s možností využití co nejširší škály dostupných materiálů ve formě plastového drátu (filamentu).
3. Navrhněte vhodné úpravy konstrukce rámu tiskárny s cílem dosažení vyšší kvality tisku. Dále se zaměřte na bezpečnost provozu vlastní tiskárny (krytování, ochrana proti přehřátí / vzplanutí apod.)
4. Proveďte experimenty pro ověření výsledků změn a vyhodnoťte je.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 55 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

[1] **REPRAP. RepRap Forums : Czech RUG [online]. 2016 [cit. 2016-10-07].**
Dostupné z: <http://forums.reprap.org/index.php?321>

[2] **REBEL 3D. Diskuse o 3D tiskárnách Rebel, RepRap atp. [online]. 2014. [cit. 2016-10-06].**
Dostupné z: <http://www.rebelove.org>

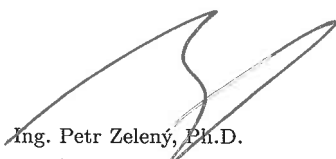
[3] **STRATASYS LTD. Professional 3D Printing. [online]. 2016 [cit. 2016-09-26].**
Dostupné z: <http://www.stratasys.com/>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Keller, Ph.D.**
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **1. února 2018**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2016

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 22.5.2017

Podpis: Polena Zuzanova

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych především poděkovala panu Ing. Petru Kellerovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, jeho cenné rady, připomínky a čas strávený při konzultacích. Dále bych chtěla poděkovat své rodině za podporu po celou dobu studií, bez které by tato práce nikdy nemohla vzniknout. Děkuji.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá úpravou konstrukce a řízení 3D tiskárny pro aditivní technologii FDM s cílem dosažení vyšší kvality tisku, optimalizací konstrukce tiskové hlavy pro dva materiály s možností využití co nejširší škály dostupných materiálů ve formě filamentu. V závěru je zaměřena na bezpečnost provozu vlastní tiskárny, což znamená krytování a ochrana proti přehřátí. Práce v úvodní části obsahuje přehled základních informací o technologii Fused Deposition Modeling, projektu RepRap, rozdělní 3D tiskáren a rozbor stávajícího stavu konstrukce 3D tiskárny.

Klíčová slova:

Fused Deposition Modeling, 3D tiskárna, tisková hlava, filament

ABSTRACT

This Master thesis deals with the design and control of 3D printer for FDM additive technology in order to achieve higher print quality, optimization of print head construction for two materials with the possibility to use the widest range of available materials in the form of filament. At the end, it focuses on the security of the operation of the printer itself, which means covering and protection against overheating. The work in the introductory section provides an overview of basic information about Fused Deposition Modeling, RepRap, 3D printer distribution, and an analysis of the current state of the 3D printer construction.

Key words:

Fused Deposition Modeling, 3D printer, extruder, filament

OBSAH

OBSAH.....	7
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	10
1 ÚVOD.....	11
1.1 Cíl práce	11
2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	12
2.1 Fused Deposition Modeling.....	12
2.1.1 Výhody FDM technologie	13
2.1.2 Nevýhody FDM technologie	14
2.2 RepRap.....	14
3 ROZDĚLENÍ 3D TISKÁREN	16
3.1 Hobby tiskárny a profesionální tiskárny	16
3.1.1 Hobby tiskárny.....	16
3.1.2 Profesionální tiskárny	17
3.2 Typy tiskáren podle konstrukce	17
3.2.1 Kartézské	17
3.2.2 CoreXY	18
3.2.3 Delta.....	18
3.2.4 Polární	19
3.2.5 SCARA	20
3.3 Otevřená a uzavřená konstrukce	21
3.3.1 Otevřená konstrukce	21
3.3.2 Uzavřená konstrukce.....	21
4 3D TISKÁRNA	22
4.1 Tisková hlava.....	22
4.2 Řízení tisku	24
4.3 Koncové spínače	24
4.4 Motory	25
4.5 Firmware.....	25
5 DOSTUPNÁ ŘEŠENÍ TISKOVÝCH HLAV	26
5.1 Jednoduché hotendy.....	26
5.1.1 Model E3D.....	26
5.2 Kombinované hotendy	27
5.2.1 Model Diamond	27

5.2.2 Model Cyclops	28
5.2.3 Prussia i3 MK2 Multi-Material Upgrade	29
5.3 Vícenásobné hotendy	30
5.3.1 Model Kraken	30
5.3.2 Model Chimera	31
5.4 Porovnání tiskových hlav	32
5.5 Podávací mechanismus	32
5.5.1 Přímý extruder	33
5.5.2 Bowden extruder	34
6 ROZBOR STÁVAJÍCÍHO STAVU 3D TISKÁRNY	36
6.1 Rozbor tiskárny Rebel II verze 32 edice Q	37
7 TISKOVÁ HLAVA PRO DVA MATERIÁLY	41
7.1 Varianta 1.1	41
7.1.1 Tisk plastových částí	43
7.1.2 Výroba obráběných dílů	46
7.1.3 Montáž	47
7.1.4 Zkouška a vyhodnocení varianty 1.1	49
7.2 Varianta 1.2	49
7.3 Varianta 2.1	50
7.3.1 Výroba chybějící dílů po variantu 2.1	51
7.3.2 Sestavení varianty 2.1 a ověření funkčnosti	52
7.4 Varianta 2.2	53
Obr. 40. Schéma působících sil	53
7.5 Varianta 2.3	56
7.5.1 Tisk plastových úchytů	57
8 ÚPRAVA KONSTRUKCE RÁMU TISKÁRNY	59
8.1 Přestavba tiskárny	59
8.2 Zapojení elektroniky	63
8.3 Bezpečnost provozu tiskárny	64
9 NASTAVENÍ TISKU A PROVEDENÍ EXPERIMENTŮ	66
Optimalizace 3D tiskárny Rebel II	66
9.1 Nastavení firmwaru	66
9.2 Nastavení a kalibrace 3D tiskárny	67
9.3 Zkouška tisku	69
10 ZÁVĚR	70

LITERATURA	72
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	76
SEZNAM TABULEK	79
SEZNAM PŘÍLOH.....	80

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

3D	Třídimenzionální
AVR	Automatic Volume Recognition
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
CAD	Computer Aided Design
CATIA V5R21	Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application
FDM	Fused Deposition Modeling
GPIO	General Purpose Input/Output
ISO	International Organization for Standardization
LCD	Liquid Crystal Display
Ltd.	Limited
NTC	Negative Temperature Coefficient
org.	Organizace
PC	Personal Computer
PC	Polykarbonát
PLA	Polylactid Acid
PTFE	Polytetrafluoretylen
PTU	Thermoplastic Polyurethane
RAMPS	RepRap Arduino Mega Pololu Shield
RepRap	Replicating Rapid Prototyper
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SD karta	Secure Digital karta
STL	Standart Tessellation Language
USB	Universal Serial Bus
X	Osa X
Y	Osa Y
Z	Osa Z
£	Britská libra

1 ÚVOD

Současný trend výroby inklinuje k maximální možné úspoře času při tvorbě a testování prototypů, a následné zavedení produktu do výroby. Zrychlení tempa výroby podnítl vznik souborů technologií Rapid Prototyping. Ať už technolog, konstruktér či designer je odpoután od konzervativního způsobu výroby, může navrhnout výrobek bez tvarové omezenosti za mnohem kratší časový úsek bez nutnosti dokončovacích operací. Metoda 3D tisku představuje poměrně novou technologii v porovnání s klasickými technologiemi, například obrábění, odlévání, tváření. Během své třicetileté existence se rychle zdokonalila a neustále se rozvíjí, existuje mnoho podob 3D tisku. I přes rozšířenost této technologie, se jedná stále o poměrně nákladný proces. Levnější alternativu k 3D tisku, ale i rozšířenost této technologie mezi širokou veřejností, zapříčinil projekt RepRap.

Teoretická část diplomové práce se zabývá principem 3D tisku, konkrétně pojednává o technologii Fused Deposition Modeling. V souvislosti s tím je zde vysvětlen pojem projekt RepRap. Následuje rozbor 3D tiskáren, popis jednotlivých typů, případně jednotlivých komponent zařízení. Porovnává různé způsoby řešení od uživatelů dané problematiky. Poté se teoretická část zaměřila na 3D tiskárnu Rebel II verze 32 edice Q, která byla použita pro realizaci diplomové práce.

Praktická část diplomové práce se věnuje návrhu a realizaci tiskové hlavy pro dva tiskové materiály. Dále představbou samotné 3D tiskárny Rebel II verze 32 edice Q. Jedná se o vhodný způsob úpravy konstrukce a řízení tiskárny. Možnost sestavit si vlastní 3D tiskárnu umožňuje osvojení dané problematiky. Uživatel pochopí okruh problémů 3D tisku a naučí se jak tiskárnu opravit či případně vylepšit. Posledním krokem bylo vyřešení bezpečnosti provozu 3D tiskárny.

1.1 Cíl práce

Cílem práce je provést rozbor stávajícího stavu konstrukce 3D tiskárny pro aditivní technologii FDM a navrhnout úpravy konstrukce a řízení dané tiskárny pro umožnění 3D tisku z dostupných materiálů.

2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

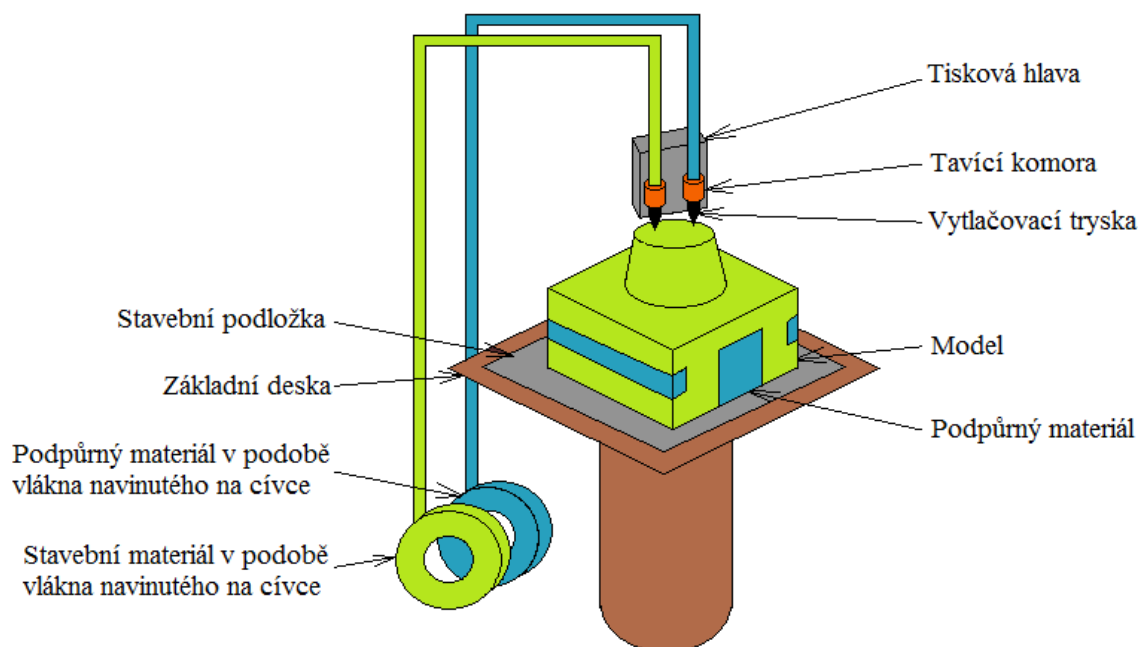
K moderním trendům ve výrobě prototypů patří zejména aditivní technologie. Podstatným rozdílem od tradičních metod jako je frézování, soustružení nebo broušení, kde dochází k odběru materiálu, aditivní metody materiál naopak přidávají. 3D tisk v mnoha průmyslových odvětvích otevírá nové obzory. Tyto aditivní technologie mají mnoho podob, jednou z nich je technologie Fused Deposition Modeling. S aditivními technologiemi úzce souvisí projekt RepRap. [1]

2.1 Fused Deposition Modeling

Fused Deposition Modeling neboli FDM patří mezi technologie aditivní výroby. Trojrozměrný návrh objektu je nejprve vytvořen v CAD softwaru, který podporuje soubory ve formátu STL. V softwaru pro 3D tisk se nastaví tloušťka jedné vrstvy, způsob vyplnění modelu, způsob stavby podpor, počet kopií, STL jednotky a měřítko. Objekt se ustaví do optimální pozice a nadefinuje se orientace ve stavební komoře. Všechny nezbytné podpůrné konstrukce jsou automaticky detekovány a generované. V rámci tohoto programu je soubor nařezán do vodorovných vrstev. Tloušťka vrstvy je závislá na průměru trysky. Software automaticky vygeneruje dráhy nástrojů.

Materiál je nejčastěji dodáván ve formě struny namotané na cívce. Struna se z cívky přivádí do vytlačovací hlavy a probíhá zahřátí na viskózní stav. Polotekutý materiál postupuje přes vyhřívanou hlavu a potom probíhá nanesení v ultra tenkých vrstvách na vyhřívanou podložku, po přejetí hlavy dojde k nanesení celé jedné vrstvy. Vyhřívaná tisková podložka eliminuje vznikající tepelnou dilataci během tisku ve stavěném modelu. Vzduch obklopující vytlačovací hlavu dosahuje nižší teploty, než je teplota tavení hmoty. Vytlačený materiál rychle tuhne. Vytlačovací hlava se pohybuje v rovině X a Y. Je-li vrstva dokončena, hlava uskuteční pohyb ve směru Z o tloušťku právě nanesené vrstvy. Takto se nanáší vrstva po vrstvě, až vznikne celý produkt. Materiály navinuté na cívce jsou uvolněny prostřednictvím podávacího mechanismu. Jeden materiál se používá k vytvoření geometrie modelu a z druhého odstranitelného materiálu se staví podpory. Po dokončení tisku následuje odstranění vzniklých podpor. S touto technologií odpadají složité dokončovací operace problematických detailů, jako jsou například složité zápichy a vnitřní prvky. FDM technologie využívá tyto materiály: ABS, PLA, PC-ISO a ULTEM 9085. To znamená, že lze vytvořit díly a prototypy s vysokou chemickou a tepelnou odolností

s vynikajícím poměrem hmotnosti a pevností. Parametry, které ovlivňují výkonnost a funkčnost systému jsou pevnost materiálu, modul pružnosti materiálu, viskozita materiálu, přesnost polohování, šířka dráhy, rychlost depozice, objemový průtok, průměr trysky, teplota a geometrie součástí. [1]



Obr. 1. Schéma technologie Fused Deposition Modeling [2]

2.1.1 Výhody FDM technologie

Výroba funkčních částí - FDM proces je schopen vyrobit prototypy z materiálů, které jsou podobné jako u skutečného vyráběného výrobku. S materiálem ABS možnost vyrobit plně funkční části, které dosahují až 85% pevnosti skutečně vyráběného dílu. Velmi užitečné zejména při vývoji výrobků, které vyžadují rychlou výrobu prototypů pro testování funkčnosti.

Efektivní využití materiálu - Snížení plýtvání materiálu na minimum oproti ostatním technologiím. V FDM procesu je použit pouze materiál, který je potřebný ke vzniku samotné součásti a stavbě podpor. Jediný odpad vzniká při odstraňování podpůrného materiálu.

Snadnost odstranění podpory - Podpůrnou konstrukci vytvořenou v průběhu stavebního procesu FDM lze snadno odlomit nebo odplavit. Pro uživatele to znamená rychlé získání prototypů a jen velmi zřídka nebo žádné provedení post-processing operací.

Rychlá změna materiálu – Stavební materiály jsou dodávány ve formě drátu navinutého na cívce, snadno se s nimi manipuluje a mohou být poměrně rychle vyměněny. Tímto se provoz stroje zjednodušuje a ulehčuje. [1]

2.1.2 Nevýhody FDM technologie

Omezená přesnost - Díly postavené technologií FDM obvykle mají omezenou přesnost vzhledem k podobě použitého materiálu, to znamená, že jsou ve formě vlákna. Obvykle se používá vlákno o průměru 1,75 mm, a to vede k omezení, jak přesně může být součást postavena.

Pomalý proces - Stavební proces je pomalý, z důvodu vyplnění celé plochy příčného průřezu stavebním materiálem. Rychlost stavby je omezena rychlostí vytlačování nebo průtoku stavebního materiálu z vytlačovací hlavy. Vzhledem k tomu, že stavebním materiálem jsou plasty a jejich viskozita je poměrně vysoká, výrobní proces nemůže být urychlen.

Nepředvídatelná smrštění - Jelikož proces FDM vytlačuje materiál z vyhřívané vytlačovací hlavy a dochází k rychlému ochlazení, dochází ke vzniku napětí v modelu. Tyto úbytky a deformace způsobené na vzniklém modelu jsou běžným jevem a jsou obvykle velmi obtížně předvídatelné. Zkušenosti uživatelé mohou být schopni toto ovšem kompenzovat nastavením parametrů procesu tisku. [1]

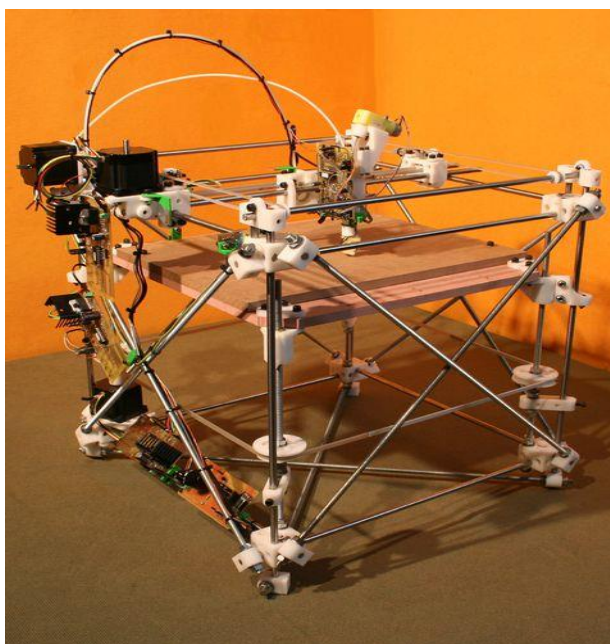
2.2 RepRap

Pod zkratkou RepRap se skrývají slova Replicating Rapid Prototyper, v překladu schopný sebereplikace a rychlého prototypování. Jedná se o první projekt open-source 3D tiskáren. Začal v roce 2005 na University of Bath doktorem Adrianem Bowyerem. Nyní projekt spravuje komunita čítající stovky vývojářů a desítek tisíc uživatelů. RepRap znamená kopírovat sám sebe a poskytovat tak tiskárny volně k dispozici ve prospěch všech. Reprap.org je projekt komunity, což znamená, že je vítán každý. Uživatelé mají možnost upravovat většinu stránek na tomto webu, nebo ještě lépe, vytvářet nové stránky - své vlastní.

Tento typ tiskárny může tisknout předměty z různých plastů. Vzhledem k tomu, že je tiskárna sama o sobě také složena z velké části z plastu, mohou být vytisknuty jednotlivé části na jiné 3D tiskárně. Proto je tato 3D tiskárna rovněž často označována jako "sama sebe replikující se". Mimo plastových částí, které tvoří velkou část konstrukce,

ostatní části musí být nezbytně zakoupeny pro sestavení. Mezi zakoupené části tiskárny patří: vodící tyče, krokové motory, ložiska, řemeny, šrouby pro sestavení, vyhřívaná skleněná deska a v neposlední řadě tisková hlava s tryskou.

Prvním RepRap model částečně replikující sám sebe byl model RepRap 1.0 Darwin. Tento model nese jméno po biologovi a zakladateli evoluční teorie Charlesovi Robertu Darwinovi. Veřejnost tento model spatřila v roce 2007. Název vystihuje princip projektu RepRap, kde se jedná o replikaci sebe, dalo by se říci o evoluci v přeneseném slova smyslu.



Obr. 2. RepRap 1.0 Darwin [7]

Zastaralost modelu Darwin 1.0 vedla k nahrazení tohoto modelu novými modely. Následující modely RepRapu nesou totožné názvy, tak jako skuteční následovníci Darwina – Mendel, Huxley a Wallace. První následovník Mendel se stal uživateli velmi oblíbený. Tento typ existuje v mnoha modifikacích, původní Mendel nese název Original Mendel. Také český výrobce Josef Průša RepRap tiskáren vyšel z tohoto modelu. Jedná se o nejrozšířenější modifikaci mezi uživateli. Výrobce se snaží využívat snadno dostupných a levných materiálů. Druhý následovník Huxley je zjednodušenou a zmenšenou variantou modelu Mendel. Stavebnice obsahuje menší množství součástek než verze Mendel. Tento model se vyznačuje dobrou přesností. Poslední uvedený model Wallace získal jméno po Alfredu Russelu Wallaceovi. Jedná se o nejjednodušší, nejlevnější 3D tiskárnu RepRap na světě. [3; 4; 5; 6; 7]

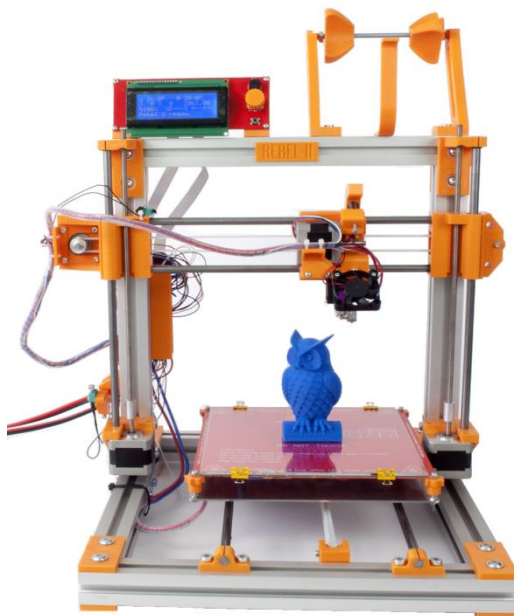
3 ROZDĚLENÍ 3D TISKÁREN

3D tiskárny lze rozdělit pomocí mnoha kritérií, například podle použité technologie, pořizovací ceny, typu konstrukce atd. Základní rozdělení 3D tiskáren z hlediska použitelnosti lze na hobby tiskárny a profesionální tiskárny. Dále podle typu konstrukce lze dělit na kartézské, delta nebo polární. A podle otevřenosti či uzavřenosti konstrukce.

3.1 Hobby tiskárny a profesionální tiskárny

3.1.1 Hobby tiskárny

Klesající náklady na pořízení 3D tiskáren, které se v sekci hobby produktů pohybují v řádech desetitisíců korun, významně přispěly k šíření 3D tisku mezi veřejností. Tento typ hobby tiskáren je převážně složen z dostupných a levných materiálů. Nejlevnější profesionální 3D tiskárny si od těch hobby tiskáren stále drží značný cenový odstup. Ačkoliv se běžnému uživateli může zdát, že ve výsledku produkují stejný výsledek. Od ceny se odvíjí i kvalita výtisků. S rostoucí cenou roste téměř vždy i kvalita a přesnost. Typickými uživateli hobby tiskáren se stali kutilové, modeláři, stavitelé, architekti, umělci či dokonce menší firmy. [8]



Obr. 3. Hobby 3D tiskárna Rebel II [9]

3.1.2 Profesionální tiskárny

Už na první pohled je patrné, která tiskárna zastupuje profesionální tiskárny a která ne. Design těchto 3D tiskáren dosahuje zcela jiné úrovně než hobby tiskáren i samotné zařízení často zaujímají objemnější prostor. Další výrazný rozdíl udává zakrytování pracovního prostoru, tedy stavební desky oproti domácím tiskárnám. Tímto zakrytováním dochází k rovnoměrnému vyhřívání celého tiskového prostoru, nejen stavební desky. Zároveň zakrytování poskytuje nejen bezpečnost samotnému dílu, ale především obsluze a okolí. Vytisknutý díl disponuje vyšší kvalitou i rychlostí stavby. Podstatným rozdílem je pořizovací cena. Cena profesionálních tiskáren může překročit hranici miliónu korun. Ovšem vysoká cena poskytuje preciznost zařízení.

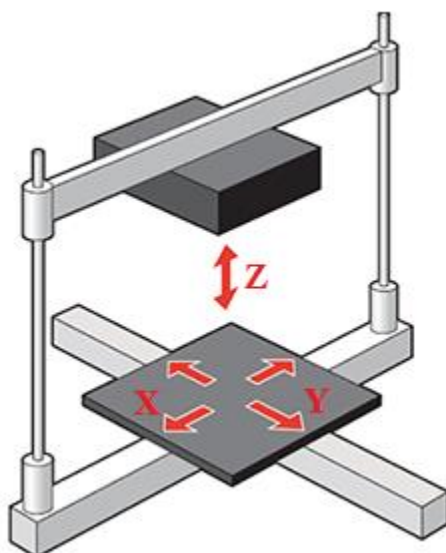


Obr. 4. Profesionální 3D tiskárna Stratasys J750

3.2 Typy tiskáren podle konstrukce

3.2.1 Kartézské

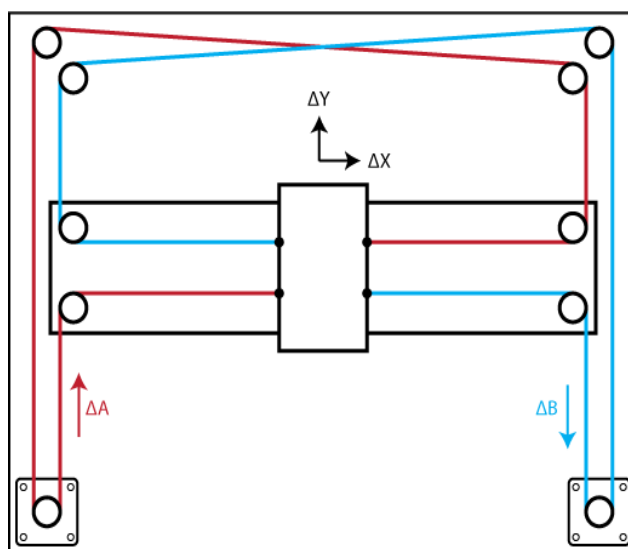
Většina 3D tiskáren využívá uspořádání tří vzájemně na sebe kolmých os. Díky podobnosti uspořádání konstrukce jako u kartézského souřadného systému vznikl název tohoto typu 3D tiskárny. Jedná se o snadný způsob pohybu po přímce z počátečního bodu do koncového bodu a to ve třech souřadnicích X, Y, Z. Na Obr. 5. se stavební podložka pohybuje v ose X a Y, pohyb v ose Z vykonává tisková hlava. V praxi je možné se setkat se všemi možnými kombinacemi uspořádání os. Nevýhoda kartézského typu znamená vyšší hmotnost pro pohyblivé díly, avšak tento typ poskytuje celkovou tuhost konstrukce. [8]



Obr. 5. Schéma 3D tiskárny kartézského typu [10]

3.2.2 CoreXY

Princip uspořádání os je obdobný jako u kartézského typu. Osy X a Y mají vzájemně závislé pohony z důvodu společného řemene pro obě osy a proto využití výkonu tímto způsobem zvyšuje efektivnost. Charakter tohoto uspořádání udává pevné uchycení motorů k rámu, tímto nedochází k nezatežování pohyblivé části. [11]

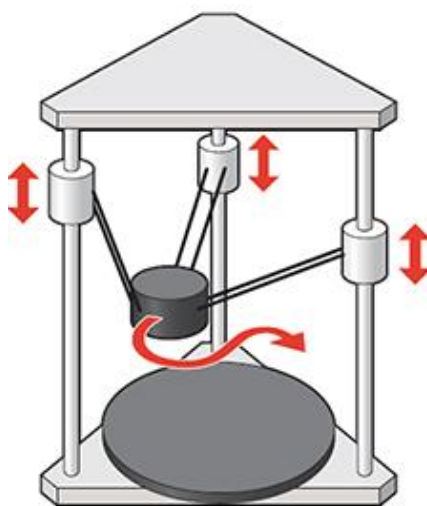


Obr. 6. Schéma os na 3D tiskárně CoreXY [12]

3.2.3 Delta

Jedná se o 3D tiskárny, kde pohyb vytlačovací hlavy umožňuje trojice pohyblivých ramen v trojúhelníkové konfiguraci, odkud název Delta. Ramena mezi sebou svírají úhel

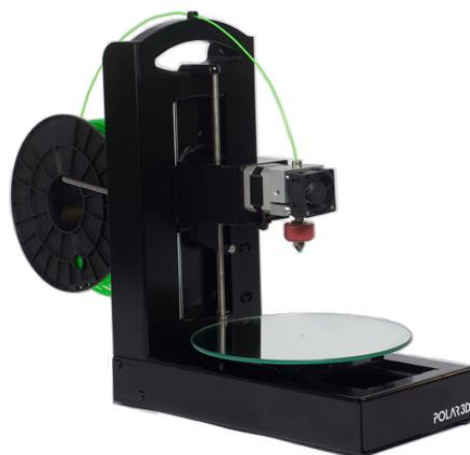
120°. Také tyto tiskárny mají motory pevně uchycené k rámu zařízení. Pohyb koncové trysky v tiskovém prostoru udává závislost na pohybu všech tří motorů. Většinou tyto tiskárny disponují s větším tiskovým objemem oproti kartézskému provedení při totožných rozměrech stavební podložky. Stavební podložka má zde kruhový tvar. Celková konstrukce je mnohem méně komplikovaná a využívá méně dílů, tím snižuje celkové náklady a náklady na údržbu. Je zde ovšem jedna nevýhoda. Vzhledem ke konstrukci ramene musí být tiskárna mnohem vyšší, než je objem stavění výtisku. Tiskárna musí mít možnost měnit směr okamžitě a tak rychle, jak je to možné. Čím těžší je pohyblivá část, tím náročnější je, aby se zastavila nebo změnila směr v jediném okamžiku. Výhodou u tiskárny Delta je lehkost pohyblivých dílů, takže se tisková hlava může snadněji pohybovat. To má za následek rychlejší tisk s větší přesností. [11, 13]



Obr. 7. Schéma 3D tiskárny typu Delta [10]

3.2.4 Polární

Čtvrtý typ 3D tiskárny pracuje s polárním souřadnicovým systémem. Je to obdobné jako u kartézského souřadnicového systému kromě toho, že každý bod je určen úhlem a vzdáleností. Tisková hlava se může pohybovat nahoru, dolů, doleva i doprava. Stavební podložka zaujímá kruhový tvar, stejně jako tiskárna typu Delta, avšak tato podložka má možnost otáčení. Velkou výhodou u polární 3D tiskárny je zajištění pohybu pomocí pouze dvou krokových motorů. V porovnání s typickou kartézskou 3D tiskárnou, která vyžaduje minimálně jeden krokový motor pro každou osu, celkově alespoň čtyři. [14]



Obr. 8. Polární 3D tiskárna od společnosti POLAR3D [15]

3.2.5 SCARA

Poslední typ hobby tiskárny reprezentuje 3D tiskárna s robotickým ramenem. Název této 3D tiskárny vychází z použitého ramene tohoto označení. Jedná se o velmi přesný systém s malými nároky na paměť. 3D tiskárna SCARA vypadá a pohybuje se podobně jako průmyslový robot na montážní automobilové lince. Extruder se pohybuje v osách X a Y. Stavební podložka vykonává pohyb ve směru osy Z prostřednictvím přesných závitových tyčí. [14]



Obr. 9. SCARA 3D tiskárna od společnosti ROBOTDIGG [16]

3.3 Otevřená a uzavřená konstrukce

3D tiskárny lze dále klasifikovat dle zakrytování stavebního prostoru na 3D tiskárny s otevřenou konstrukcí a 3D tiskárny s konstrukcí uzavřenou.

3.3.1 Otevřená konstrukce

Výhodou otevřené konstrukce tiskárny je možnost vizuální kontroly probíhající tiskové úlohy. Dále snadný přístup k tiskové podložce, extruderu i k ostatním částem tiskárny v případě poruchy. Vhodné pro očištění stavební podložky po předchozím tisku nebo naopak pro ošetření před zahájením nového tisku. Nevýhodou otevřenosti je především to, že nechrání tisknutý objekt před okolními vlivy (teplota, proudění vzduchu). Což vede ke snížení kvality výtisku. A také okolí není chráněno například před dotykem horkých částí tiskárny. Otevřenou konstrukci znázorňuje Obr. 3. v kapitole 3.1.1 Hobby tiskárny. [17]

3.3.2 Uzavřená konstrukce

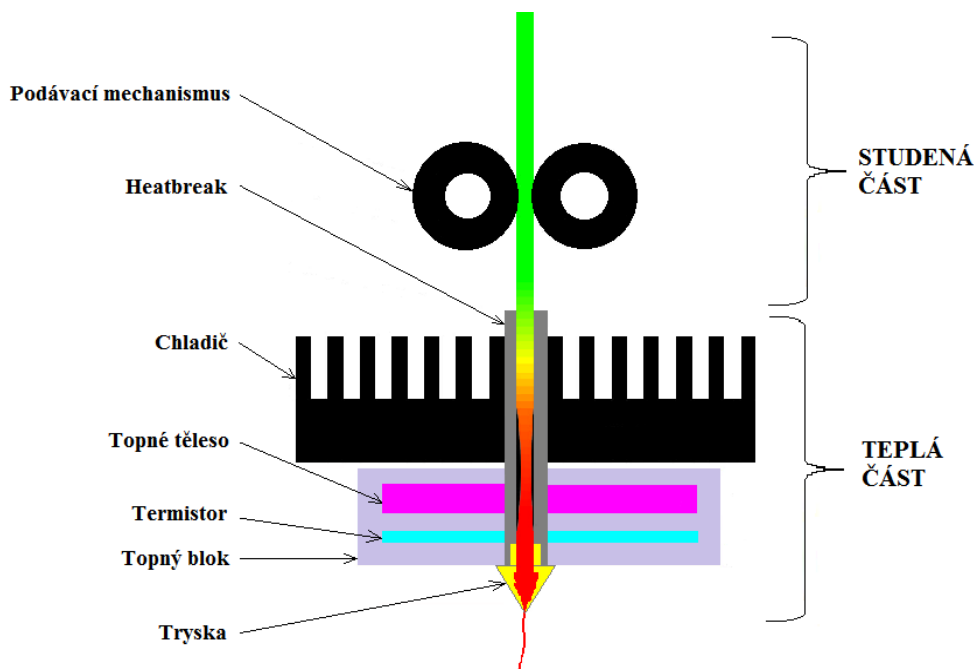
Uzavřené rámy 3D tiskáren mají uzavřenou strukturu s dveřmi, stěnami a víkem. Uzavřený rám zabezpečuje ochranu pro okolí (obsluha, zvířata). Zamezuje náhodnému dotyku na teplou část extruderu. Uzavřenost zajišťuje tišší provoz, což snižuje hluk ventilátoru. A může snížit možný zápach při tisku například z materiálu ABS. Ve srovnání s otevřenou konstrukcí může být zhoršen přístup k některým komponentům zařízení. Proto stavební podložky jsou často vyjímatelné. Příklad uzavřené konstrukce znázorňuje Obr. 4. v kapitole 3.1.2 Profesionální tiskárny. [17]

4 3D TISKÁRNA

3D tiskárna se skládá z nosného rámu a tiskové hlavy, která vytlačuje nahřátý materiál na vyhřívanou podložku. K řízení tiskárny se využívá řídicí deska s LCD displejem, dále z koncových spínačů, motorů a firmware.

4.1 Tisková hlava

Tisková hlava, též označována jako extruder, představuje v 3D tisku komplexní součástku tiskárny, která uskutečňuje samotný tisk. Lze to přirovnat k typické inkoustové tiskárně v tom, že se pohybuje v prostoru po daných souřadnicích, natavuje filament a následně ho vytlačí na stavební podložku. Může vypadat zcela odlišně v závislosti na typu tiskárny. Výběr tiskové hlavy hraje důležitou roli při určování schopnosti tiskárny. Maximální teplota, rychlost tisku, průměr vlákna, požadavky na napájení, kontrolní panel a dokonce i výška vrstvy – to vše ovlivňuje. Extruder se rozděluje na studenou část a na teplou část. Do studené části spadá podávací mechanismus a do následné teplé části heatbreak, topné těleso, termistor, chladič a tryska. [18]



Obr. 10. Schéma tiskové hlavy [19]

Cesta odvíjeného filamentu začíná podávacím mechanismem tvořený krokovým motorem, který nese odpovědnost za přívod plastového vlákna do teplé části. Může být buď přímý, nebo poháněný ozubeným kolem, nicméně přímý pohon je oblíbený pro svoji jednodušší konstrukci. Hnací ozubené kolo představuje lepší způsob, jak poskytnout přítlačnou sílu na plastové vlákno. Ozubené kolo se nepatrně při svém pohybu zařezává do vlákna. Dostatečný přítlak z druhé strany zajišťuje například ložisko. Bez této vzniklé přítlačné síly nebude odvíjen filament. Příliš vysoký přítlak může způsobit drobení materiálu a naopak příliš malý přítlak k prokluzu materiálu. Také může nastat nedostatečné natavení, které povede k nevyhovujícímu tištěnému objektu. [18, 19]



Obr. 11. Ozubené (hnací) kolo podávacího mechanismu [20]

Heatbreak představuje spojník mezi podávacím mechanismem a topným blokem s tryskou. V této části dochází k zlomovým teplotám. Zatímco v místě dotyku heatbreaku s tryskou dosahuje teplota mnoha stupňů celsia, v místě vstupu filamentu do heatbreaku požadujeme co nejnižší teplotu.

Chladič slouží k odvodu tepla z heatbreaku. Omezuje hrozbu natavení tiskového materiálu v horní části heatbreaku a jeho následného zanesení. Pro zvýšený efekt chlazení se dále využívá ventilátor. Tvar chladiče je určen druhem vytlačovací hlavy.

Topný blok umožňuje natavenému filamentu přechod z heatbreaku do trysky. Dále obsahuje topné těleso s termistorem. V Topném tělesu se pro přeměnu elektrické energie na tepelnou se využívá rezistor. Rezistorem je vytápěn topný blok, ve kterém je topné těleso zajištěno. V současnosti je nejběžněji nabízeným topným tělesem pro tiskárny typu RepRap těleso s keramickým jádrem o výkonu 40 W a napětím 12 V, to odpovídá přibližně proudu 3,3 A. U termistoru se v podstatě jedná o tepelné čidlo k regulaci teploty trysky. Nejběžněji aplikované termistory jsou NTC o rezistivitě 100 k Ω o maximální teplotě 300°C. [21, 22]

Tryska představuje koncový článek celé soustavy vytlačovací hlavy. Tavenina zahřátá na pracovní teplotu opustí trysku a je nanasena na vyhřívanou podložku

nebo na již vytvořenou předchozí vrstvu materiálu. Teplota znamená důležitý parametr pro správné natavení materiálu, pohybuje se v rozmezí 160°C až 250°C. Konkrétní hodnoty závisí na použitém materiálu, kde hraje roli například kvalita materiálu, hustota nebo rychlost výtisku. Pro tisk nejběžnějších tiskových materiálů (ABS a PLA) se používá mosazná tryska. Průměr hrotu trysky udává množství vytlačeného materiálu a tvar hrotu vyrovnává stopu z plastu. Kromě trysky je nutné vyhřívat také stavební podložku, na kterou se tiskne. Důraz je kladen hlavně při tisku první vrstvy, aby se nahřátý materiál usadil správně na podložku. Vyhřívaná podložka zabraňuje efektu postupného kroucení výtisků během tisku z materiálů s výraznější tepelnou roztažností, např. ABS. Aby se těmto negativním jevům předešlo (například odtrhnutím modelu od podložky), měla by podložka dosahovat teploty v rozmezí 60°C až 110°C. [22]

4.2 Řízení tisku

Řídicí deska udává veškeré úkony tiskárně. Nejčastěji je řídicí jednotka postavena na prototypové platformě Arduino obsahující 8bitové mikrokontrolery z rodiny AVR od firmy Atmel a množství dalších podpůrných obvodů. Disponuje s obvody pro rozhraní USB pro připojení k osobnímu počítači a také může obsahovat rozhraní pro připojení čtečky SD karet, LCD displeje nebo pro inkrementální spínač. Ve 3D tiskárnách se využívá převážně typ Arduino Mega 2560 s přídatným modulem shield označovaný RAMPS. Deska Arduino zabezpečuje logickou část procesu a modul RAMPS se stará o všechny výkonové prvky a senzory. [11, 23]

Řádkový LCD displej zajišťuje ovládání 3D tiskárny. Pomocí displeje se provádí základní nastavení či kalibrace tiskárny. Displej ukazuje dobu tisku, konkrétní fázi tisku, teploty tiskových hlav apod. Součástí displeje často bývá integrovaná čtečka paměťových SD karet. Pokud je vložena SD karta s vygenerovaným G-kódem pro tisk, odpadá nutnost připojení zařízení k počítači. Lze snadno připojit pomocí kabelů a adaptéru k ovládací desce RAMPS. [11]

4.3 Koncové spínače

Koncové spínače neboli endstopy z anglického označení. Tyto spínače jsou ve většině případů celkem tři, ovšem některé elektroniky jich mají šest. Bývají umístěny na počátku jednotlivých os X, Y a Z. Slouží k tomu, aby tiskárna měla přehled o tom, kde

se nachází počátek souřadnicového systému. Do tohoto počátku vždy tisková hlava najede před začátkem tisku.

Endstopy tvoří obyčejný spínač a pull-up rezistor. Což znamená jednoduché a levné řešení. Spínač stačí připevnit na rám tiskárny a připájet vodiče. Mezi nedostatky patří omezený počet cyklů spínače, mechanické stárnutí a vznikající zákmity. Z těchto příčin se začaly používat i optické endstopy tvořené třemi rezistory a jednou optozávorou. [22]

4.4 Motory

Zpravidla 3D tiskárny obsahují počet motorů v závislosti na typu extruderu. Každá osa má většinou svůj vlastní motor, někdy i dva. Pro osy X, Y a Z je nutné použít motory o hodnotě točivého momentu 14 Ncm a více. Pro extruder přinejmenším o velikosti 40 Ncm. Uvedené hodnoty jsou spodní hranicí a doporučuje se motory předimenzovat. Motory nebudou proudově zatěžovány stále na 100% a sníží se i jejich zahřívání. Vyšší hodnota točivého momentu bude moci poskytnout prostor pro další experimenty. Dále se doporučuje 200 nebo 400 kroků na otáčku a proud do cívky nejvýše 2 A. [22]

4.5 Firmware

Firmware zastupuje software, který běží v řídicí desce 3D tiskárny. Řídí veškeré připojené příslušenství. Firmware je spojovacím článkem mezi softwarem a hardwarem, vysílá příkazy v G kódu a podle toho řídí pohyb. Před nahráním G kódu do Arduina, je v něm třeba nadefinovat všechny potřebné charakteristické veličiny tiskárny, například počet vytlačovacích hlav, rozměry, nastavení teplot vytápění, použitá řídicí deska atd. Konfigurace firmwaru je jedinečná pro každou tiskárnu. To hraje důležitou roli v kvalitě tisku. Programovací jazyk pro firmware RepRapu je zde využit Wiring, což je jazyk vyvinutý pro Arduino. [24]

5 DOSTUPNÁ ŘEŠENÍ TISKOVÝCH HLAV

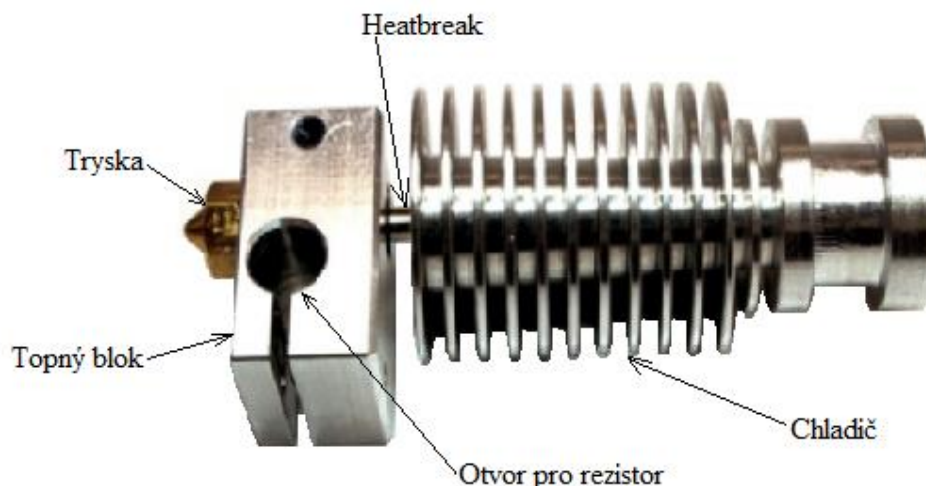
V současné době existuje nespočet možných variant tiskových hlav pro 3D tiskárny. Otevřenost projektu RepRap poskytuje možnost sdílení velkého množství informací mezi uživateli navzájem. V této kapitole jsou uvedena nejčastější řešení tiskových hlav. V praxi často dochází ke kombinaci těchto řešení.

5.1 Jednoduché hotendy

Tato kategorie představuje jednoduché hotendy s jedním vstupujícím materiálem a s jedním vystupujícím materiálem. Vzhledem k přítomnosti jednoho filamentu nedochází k natavování a promíchání s jiným materiálem, což znamená individuální natavování. Odpadají jakékoliv obtíže s kalibrací či nastavením správné vzdálenosti pro každou trysku. S přítomností jednoho materiálu není možné stavět podpůrné konstrukce a tisknout tak složitější geometrické tvary. Pro svoji jednoduchou funkci disponují i nižší cenou oproti kombinovaným či vícenásobným hotendům.

5.1.1 Model E3D

Tepelný blok umožňuje nejkratší dobu zahřátí a nejodpovědnější regulaci teploty tím, že se upíná kolem tiskové kazety pro maximální tepelný kontakt. Nové umístění termistoru poskytuje nejpřesnější měření teploty s nejrychlejší odezvou. Přejchod z teploty 20°C na 200°C za pouhých 65 sekund. Standardní tryska s průměrem hrotu 0,3 mm vytváří skvělé výtisky s dobrou rovnováhou rychlosti, snadnosti a rozlišení. Možnost výměny trysky z řady trysek, které mají speciální geometrii přizpůsobenou specifickým potřebám. Geometrie trysky se uzpůsobila tak, aby mohla snadno tisknout velké vrstvy materiálu. Vnitřní tvar trysek umožňuje snížit tlak potřebný pro vytlačování, což má za následek vyšší spolehlivost a lepší kvalitu tisku. Trysky jsou snadno a rychle vyměněny kvůli jejich šestiúhelníkovému tvaru. [25]



Obr. 12. Model E3D [25]

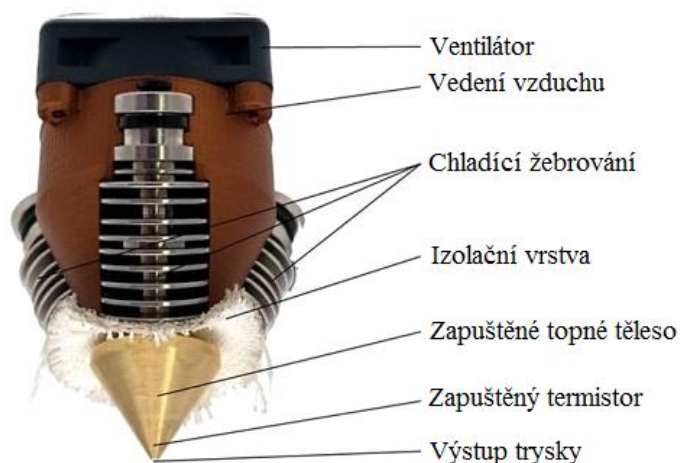
5.2 Kombinované hotendy

Tento typ hotendů vyvinutý pro 3D tisk kombinuje několik topných komor spojujících se v centrální trysce. Daná míchací oblast, kde se setkávají vlákna, není velkých rozměrů. Jediná tryska odstraňuje kalibrační problémy trysek pro každou barvu či materiál a nedochází k zmenšení tištěného objemu. Dosahuje díky tomu vyšší přesnosti ve srovnání s použitím více trysek. Při čistém přechodu mezi jednotlivými vlákny je třeba stavět věž pro zbytkový materiál. Tato věž je stavěna souběžně s tištěným dílem. V případě změny materiálu či barvy, je na tuto věž vytištěna přechodová vrstva, která má za účel vytěsnění zbytků předchozí barvy či materiálu. Výsledkem je zcela čistá vrstva bez jakýchkoliv pozůstatků předchozího vlákna. Naopak dokáže oproti ostatním hotendům promíchat a natavovat více barevných vláken dohromady a vytvářet tak předměty v duhových barvách. Nevýhodou je tisknutí dílů z materiálů s téměř totožnou tavící teplotou, proto se využívá převážně pro stejné materiály různých barev. Významným zástupcem kombinovaných hotendů je trojnásobná tryska model Diamond nozzle. [26, 27]

5.2.1 Model Diamond

Hlavním rysem modelu Diamond Hotend je celokovová tryska ve tvaru diamantu. Tryska obsahuje nejmenší mixážní komoru, aby posuny barev byly tak rychlé, jak je to možné a aby se zabránilo zbytečnému plýtvání vlákna. Tělo trysky je vyrobeno z mosazi, která se vyznačuje dobrou tepelnou vodivostí, obrobitelností a korozivzdorností. Společná tryska o průměru 0,4 mm obsahuje 3 vstupy pro tiskové struny o průměru 1,7 mm. Vstupy pro tiskové struny jsou opatřeny závity pro připojení k tiskové hlavě. Chlazení je zajištěno

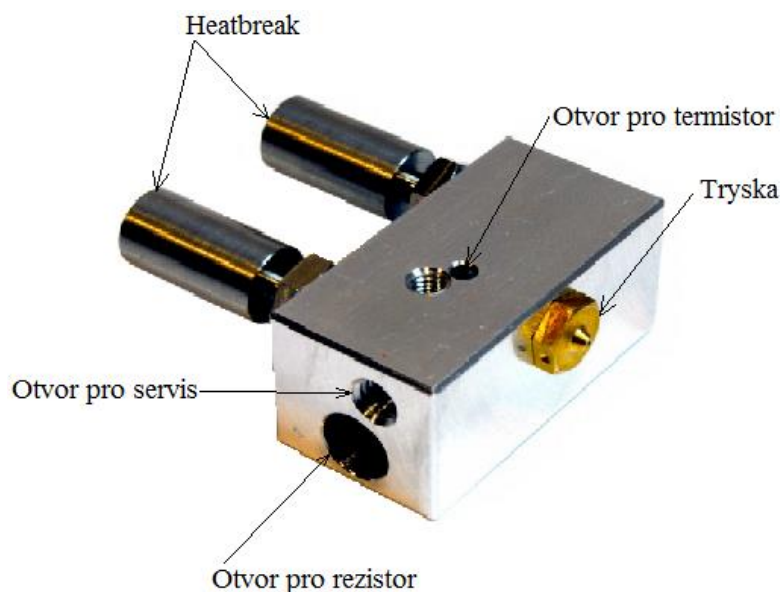
pomocí účinného ventilátoru. Hmotnost celého sestaveného modelu je 250 gramů. Mezi jeho přednosti patří kompaktní provedení, možnost míchání barev, kompatibilita s celou řadou 3D tiskáren, lepší přesnost v porovnání s vícenásobnými tryskami, tisk třemi různými barvami a minimální odpad. [26]



Obr. 13. Model Diamond nozzle [26]

5.2.2 Model Cyclops

Dalším zástupcem této kategorie je model Cyclops. Na vstupu jsou dva filameny o průměru 1,75 mm a výstup tvoří jedna vyměnitelná tryska. Vyměnitelnost trysky umožňuje dostupnost do tavící komory a změnu průměru tištěného materiálu. Vzhledem k principu funkce tavící komory je třeba vyvodit větší tlak přiváděnými filameny. Důležitá je také přítomnost obou materiálů. V případě absence jednoho materiálu se natavený filament vydá cestou menšího odporu, tedy cestou chybějící struny, to povede ke ztuhnutí ve studené části tiskové hlavy a znemožní další tisk. V takovém případě je nezbytné zanesené části tiskové hlavy rozebrat a vyčistit. Během prvního tisku je nutné oba filameny vtlačit co nejhlouběji do tiskové hlavy. Dále je doporučeno při tisku s výměnou filamentů navolit v ovládacím softwaru zpětné povytažení již nepoužívaného filamentu přibližně o 1 mm až 2 mm. Toto povytažení zabrání vytékání tiskového materiálu, způsobené zbývajícím tlakem předchozího materiálu a zároveň nového materiálu. Za vhodný materiál pro kvalitnější tisk se považuje materiál PLA. [28]



Obr. 14. Model Cyclops [28]

5.2.3 Prussia i3 MK2 Multi-Material Upgrade

Tato inovace od společnosti Prusa Research s.r.o. umožňuje tisknout ve čtyřech barvách pouze s jediným hotendem. Základní myšlenkou je čtyřcestná dráha filamentu ve tvaru písmene Y. Dráhu určuje Y bowden. Každá barva filamentu je vložena do samostatného extruderu a po výměně materiálu se současně "aktivní" filament vytáhne z ohřívacího bloku těsně předtím, než se začnou křížit dráhy s ostatními filamenti. Poté, co se vlákno vymění v bowdenu, zbytek předchozí barvy filamentu se vytlačí na malou věž o rozměrech 3×5 cm.

S přidáním tří dalších barevných filamentů je třeba přidat tři další krokové motory do sestavy bez nutnosti výměny desky elektroniky tiskárny. Řešením je multiplexer, který umožňuje jeden výstup krokového motoru a několik GPIO pro ovládání čtyř motorů. Tisková hlava poskytuje perfektní doplnění barev. Není třeba žádné další kalibrace. Není nijak snížen pracovní objem a minimální přidané zatížení na pojezd extruderu. [29, 30]



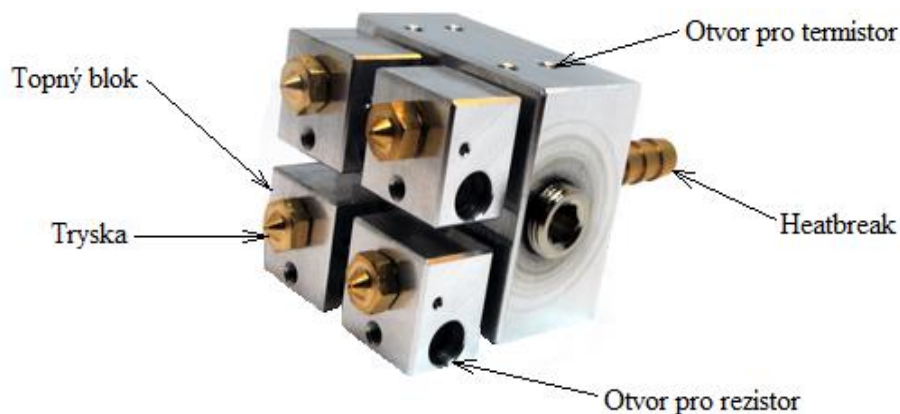
Obr. 15. Prussia i3 MK2 Multi-Material Upgrade [31]

5.3 Vícenásobné hotendy

Vícenásobné hotendy dávají možnost tisknout z více než jednoho tiskového materiálu. Nejedná se pouze o použití více barev ale i o použití různých materiálů. S použitím minimálně dvou materiálů je možné tisknout složitější geometrické tvary s použitím podpůrné konstrukce. Toto podporuje větší kreativitu ve vizuálním designu tištěných modelů. Problematikou u této kategorie bývá přizpůsobení výšky každé trysky. Významným zástupcem této kategorie je model Kraken se čtyřmi tryskami.

5.3.1 Model Kraken

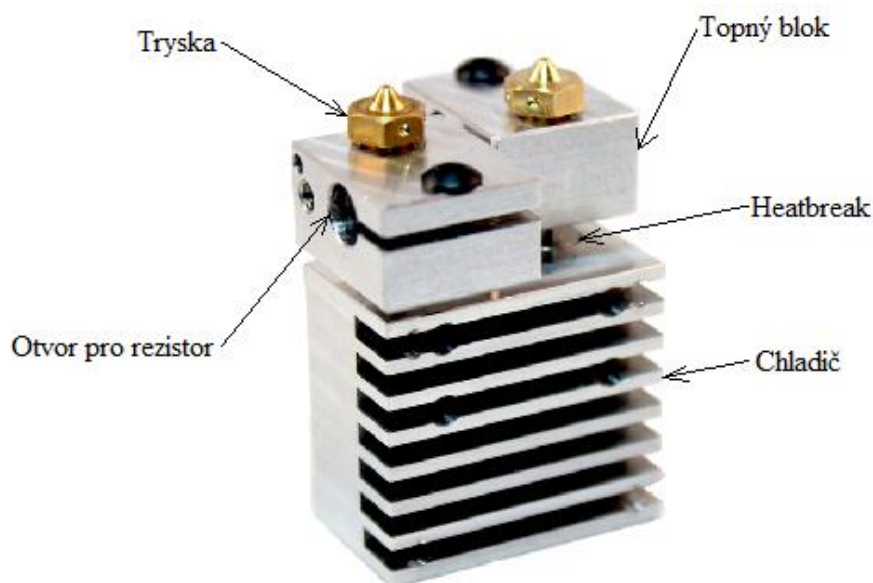
Originální rám konstrukce svým tvarem připomíná mystické stvoření Kraken, podobnosti dopomáhají použítá ramena. Model umožňuje vícenásobné vytlačování. Disponuje čtyřmi kompletními hotendy obsaženými v jednom. Do každé trysky je jednotlivě přiváděna tisková struna s možností individuální regulace teploty. Dále má schopnost přizpůsobit výšku každé trysky. Zajišťuje vysoce účinné chlazení vodou a inovativní integrované bowdenové spoje jsou obsaženy v těle modelu. Vzhledem k dispozici čtyř hotendů je zde možné tisknout se čtyřmi odlišnými barvami v jednom. Umožňuje použití čtyř rozdílných plastových strun nebo vytvořit složitou geometrii vytištěného modelu s použitím rozpustných nebo odlomitelných nosných konstrukcí. Model Kraken vyžaduje instalaci elektroniky, která je schopna řídit čtyři samostatné tiskové hlavy. [32]



Obr. 16. Model Kraken [32]

5.3.2 Model Chimera

Na vstupu jsou dva otvory pro filamenty o průměru 1,75 mm a výstup opět tvoří dvě trysky pro dva vystupující filamenty. Hotend obsahuje dvě tavící komory, proto zde nedochází k promíchání natavené struny v tavící komoře. Trysky lze individuálně nastavit na žádanou výšku. Každá tryska umožňuje individuální ovládání teploty. Jedná se o kombinaci hotendů E3D a Kraken do jediného, spolehlivého, ale velmi schopného s malými rozměry 30 × 28 mm a snadnou montáží. [33]


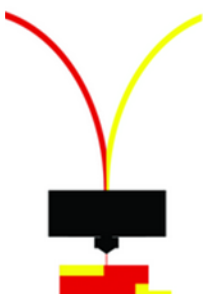
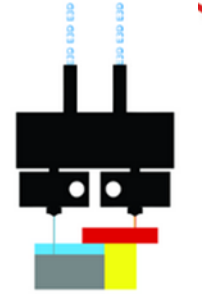
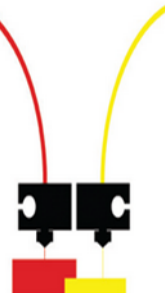


Obr. 17. Model Chimera [33]

5.4 Porovnání tiskových hlav

V předchozích podkapitolách byly podrobně popsány jednotlivé tiskové hlavy. Porovnání tiskových hlav zobrazuje ilustrovaná Tab. 1. Tabulka obsahuje schéma dané tiskové hlavy ale i počet vstupních a výstupních materiálů, možnost promíchání materiálu, zda je možné individuální tavení materiálu, způsob chlazení a cena. Tyto čtyři typy tiskových hlav jsou od společnosti E3D-online.

Tab. 1. Porovnání tiskových hlav se základními parametry [33]

	E3D	Cyclops	Kraken	Chimera
				
Vstupní materiál	1	2	4	2
Výstupní materiál	1	1	4	2
Míchání materiálu	Ne	Ano	Ne	Ne
Individuální tavení	Ano	Ne	Ano	Ano
Typ chlazení	Vzduch	Vzduch	Voda	Vzduch
Cena	£55.50	£90.00	£145.00	£83.00

5.5 Podávací mechanismus

Další z kritérií, podle kterého lze tiskové hlavy neboli extrudery rozdělit, je způsob jakým podávací mechanismus přivádí filament do teplé části tiskové hlavy k natavení. Většina tiskáren využívá systém přímého extruderu nebo pomocí tzv. Bowden extruderu. Než budou uvedeny rozdíly mezi přímým extruderem a Bowden extruder, jsou uvedeny podobnosti pro oba typy.

Všechny extrudery mají motory. Ploché 3D tiskárny obvykle používají krokové motory. Ne všechny krokové motory jsou podobné. Mohou disponovat s délkou kroku 0,9° nebo 1,8° atd. Mohou mít různé hodnoty napětí, různé proudové stupně anebo mohou poskytovat různou hodnotu točivého momentu. U těchto detailů je důležité zdůraznit, že žádná z těchto specifikací není lepší nebo horší pro použitý motor extruderu. Požadavky na motor potřebné pro správnou funkci extruderu budou většinou záviset na konkrétním nastavení sestavy extruderu a nastavení tiskárny.

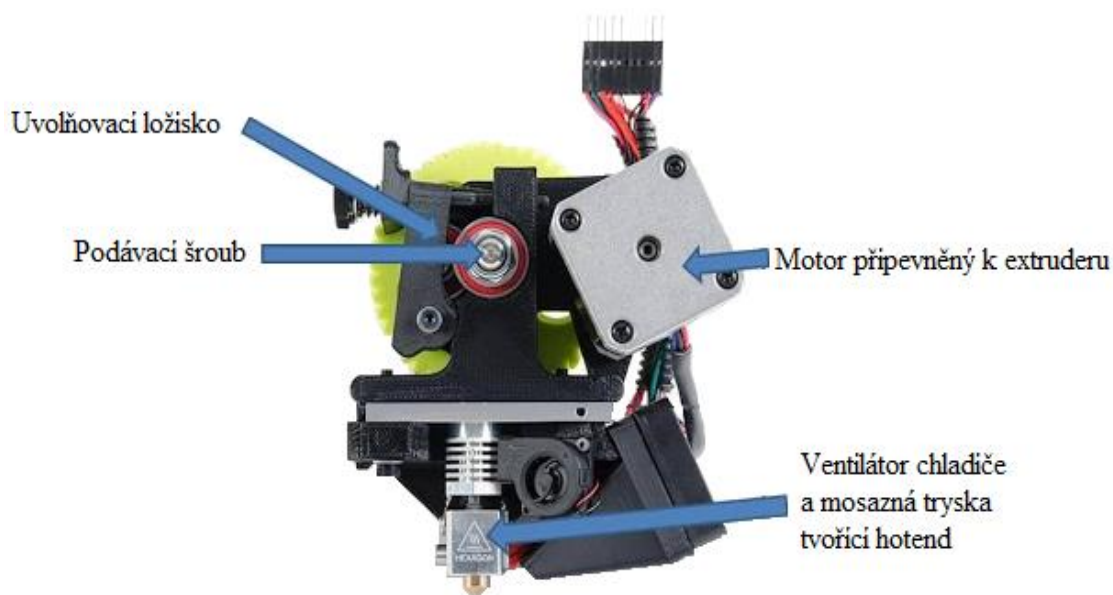
Je zapotřebí, aby se filament zachytil a vytlačil se přes horký konec. Nejběžnější jsou drobné ocelové převody, které jsou tvořeny podávacími šrouby. Pod podávacím šroubem je myšleno, že do něj byly nataženy drážky nebo zuby. Převody jsou namontovány na hřídel motoru a šrouby jsou typicky poháněny motory s extruderem s ozubenými koly. Je důležité na kladku použít vhodný přítlak proti filamentu k hnacímu zařízení. Příliš nízké, vysoké hodnoty či nespojitý přítlak povede k problémům. [20]

5.5.1 Přímý extruder

Samotný extruder může vypadat velmi odlišně v závislosti na tiskárně. Přímé extrudery jsou zkrátka extrudery, které jsou přímo připojeny k teplé části. Podávací mechanismus používá podávací ozubená kola pro vedení vlákna do teplé části. Často využívají filament o průměru 3 mm. Je důležité si uvědomit, že přímý extruder nemusí být nutně stejný jako extruder s přímým pohonem. Extruder s přímým pohonem znamená, že pohonný mechanismus je přímo namontován na hřídeli motoru. Oba extrudery, jak přímý tak i Bowden, mohou být přímo poháněny.

Jednou z hlavních výhod přímého extruderu je velmi krátká vzdálenost mezi hnacím mechanismem a horkým koncem. Kratší vzdálenost zajišťuje lepší odezvu na protlačování a vytlačování nataveného filamentu. Vyžaduje také menší točivý moment než Bowden extruder k vytlačování tiskového vlákna horkým koncem. Lepší odezva může přinést čistější výtisky - tedy lepší kvalitu povrchu. Požadavek nižšího točivého momentu znamená, že může být použit menší motor, nebo stejný motor s nižší hodnotou proudu. Kratší vzdálenost může také usnadnit tisk s pružnými materiály jako: Ninjaflex, Soft PLA a TPU. Přestože mnoho přímých extruderů vyžaduje jemnou modifikaci pro specifické zacházení s pružnými vlákny, obecně jsou přímé extrudery více vhodné pro pružné materiály než extrudery Bowden.

Protože přímé extrudery jsou přímo připojeny k horkému konci, musí se materiál pohybovat spolu s horkým koncem. Přesouvání většího množství hmoty znamená pomalejší zastavení tisku, větší pravděpodobnost nevhodné vůle, překročení objemu materiálu a zakolísání rámu tiskárny. Totéž platí pro tiskárnu. Firmware tiskárny vypočítává zrychlení, zpomalení a změny směru pro každou část. Firmware neví, kolik váží horký konec, jak pevný je rám tiskárny, nebo jak pevné jsou vaše řemeny. Přidaná hmotnost také vyžaduje větší proud motoru, který generuje více tepla. [18, 20]



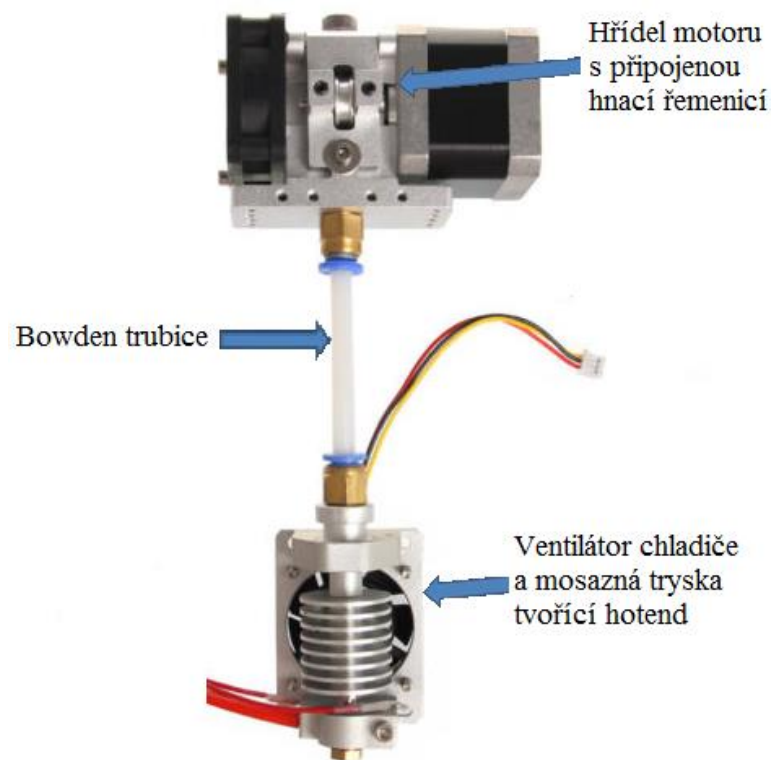
Obr. 18. Přímý extruder LulzBot [20]

5.5.2 Bowden extruder

Bowden extruder není přímo připojen k horkému konci. Namísto toho se trubice rozkládá od těla extruderu k horkému konci. Toto se nazývá bowden trubice. Nejčastěji se jedná o trubku z PTFE. Vlákno je omezeno trubicí a prochází skrz do horkého konce.

Všechny výhody Bowden extruderu souvisejí s tím, že nemají přidanou hmotnost těla extruderu (motor, ozubené kolo atd.). Tiskárna s Bowden extruderem se pohybuje a tiskne rychleji a přesněji než stejná tiskárna s přímým extruderem. Ovšem největší nevýhoda Bowden extruderů souvisí se správným zavedením a zvlněním filamentu či vyprázdněním hotendu. Zvýšená vzdálenost mezi bodem zabírání filamentu a horkým koncem zvyšuje zpoždění systému. Toto představuje slabý článek. Na filament působí více tření, protože musí postupovat mnohem dál od místa zabírání ozubení k horkému konci. To

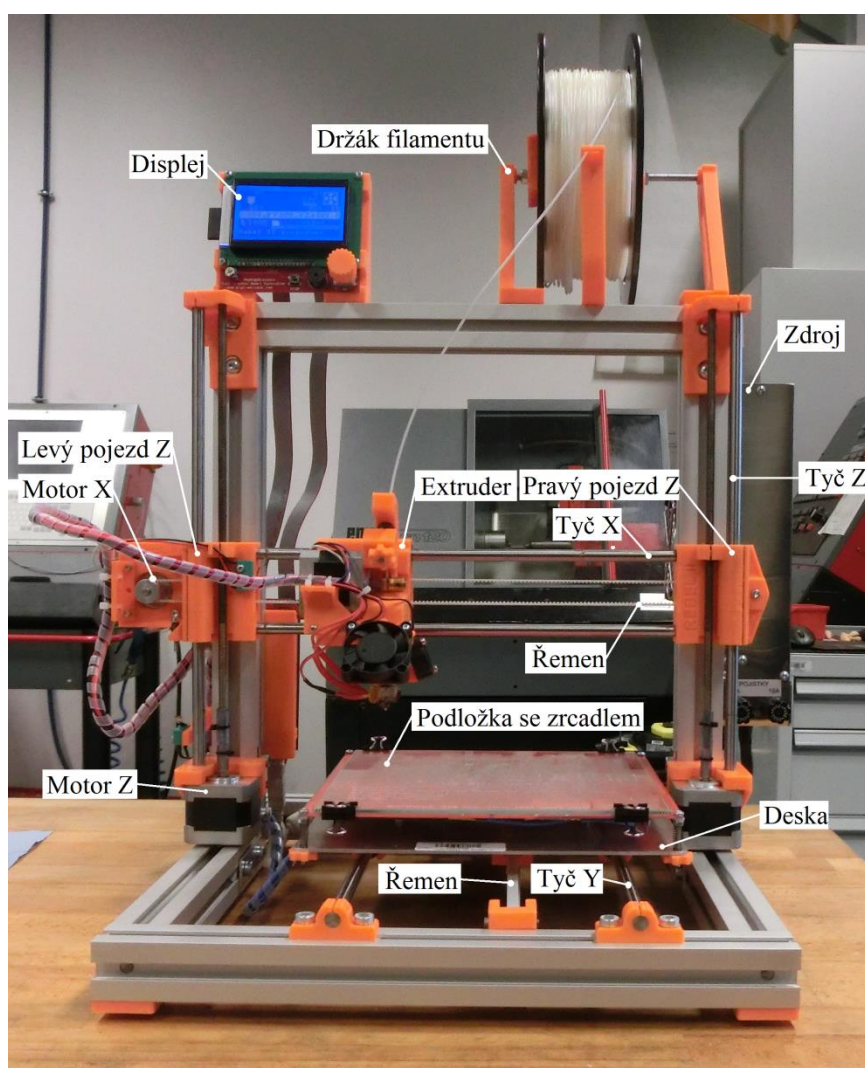
může vyžadovat použití extruderu s přídavným krouticím momentem. Zvýšené tření může také ztěžovat tisk pružných vláken. [20]



Obr. 19. Bowden extruder Geeetech GT9L [34]

6 ROZBOR STÁVAJÍCÍHO STAVU 3D TISKÁRNY

Seznámit se stávajícím stavem konstrukce 3D tiskárny byl první krok. 3D tisk funguje na principu technologie Fused Depositon Modeling. Tato tiskárna umožňovala tisk pouze z jediného materiálu. Tisk může být realizován ze všech běžných tiskových materiálů. Běžná rychlost tisku se pohybuje okolo 120 mm/s, kvalitnější tisk přibližně 60 mm/s a maximální kvalita tisku na 25 mm/s. Souřadný systém této konstrukce patří do kategorie kartézského s otevřenou konstrukcí. [35, 36]



Obr. 20. Popis 3D tiskárny Rebel II

6.1 Rozbor tiskárny Rebel II verze 32 edice Q

Mezi jednotlivými komponenty stavebnice nalezneme plastové vytisknuté díly i komerčně vyrobené díly. Plastové díly jsou vytištěné na 3D tiskárně Velleman K8200 a Rebel 2. Díly jsou tištěny z velmi kvalitního ABS v barvě oranžové, s výškou vrstvy 0,3 mm a hustotou výplně 25%.

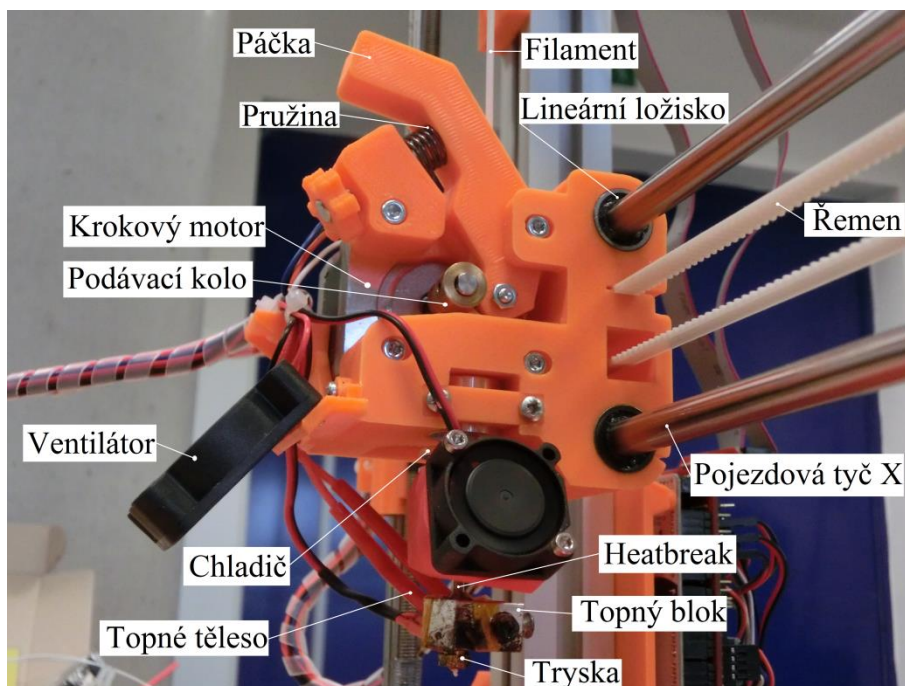
Tab. 2. Seznam použitých komponentů v 3D tiskárně Rebel II

Název dílu	Kusů	Název dílu	Kusů
Pojezdové a závitové tyče	8	Koncové spínače	3
Hliníkové profily	7	Vyhřívaná podložka	1
Tištěné díly	48	Skleněná deska	1
Krokové motory	5	Deska pojezdu Y	1
Zdroj	1	Drivery krokových motorů	4
Spojovací materiál	295	Modul RAMPS	1
Hotend	1	Filament driver	1
Grafický displej	1	Řemeny	2
Nářadí	1	Řemenice	2
Ložiska	12		

Rám tiskárny se skládá ze sedmi hliníkových profilů. Spodní část rámu tvoří obdélníkový tvar s vyhřívanou podložkou se sklem. Tisková plocha disponuje s rozměry $190 \times 190 \times 180$ mm. Následně na spodní část rámu je kolmo situována svislá část rámu - portál. V rámu se nachází šestnáct profilových matic. Tyto profilové matice slouží k upevnění částí stavebnice k hliníkovým profilům. Rohy rámu zajišťují vazby rohů a rohovníků.

Osa X - směr zleva doprava. Vodící tyče v ose X jsou uloženy do čtyř kuličkových ložisek, které jsou vmáčknuty do spodní i horní části extruderu. Zajišťují přesnější a stabilnější pojezd. Na levý pojezd je přišroubován koncový spínač X. Řemenice pro osu X je vložena do pravého pojezdu a je zašroubovaná. Řemen s ocelovou výztuží prochází otvorem v plastovém pojezdu extruderu. Plastový pojezd extruderu uchycuje krokový motor o točivém momentu 0,5 Nm. Hřídelka motoru nese podávací mechanismus - ozubené podávací kolo. Tisková hlava dále disponuje páčkou, pomocí které pružinka

udává přítlak filamentu k podávacímu kolu. Případný filament postupuje do heatbreaku. Heatbreak je obsažen v chladiči, který je ochlazován menším ventilátorem. Menší ventilátor je napájen napětím 12 V s nižšími otáčkami a hlučností. Pro zintenzivnění chlazení je k dispozici další ventilátor. Úkolem heatbreaku je vedení filamentu od podávacího mechanismu k trysce. Filament se nahřívá v topném bloku s termistorem a tiskovou hlavu opouští skrz trysku. Polotekutý materiál se protlačuje dírou v trysce o průměru 0,3 mm. [35, 36]

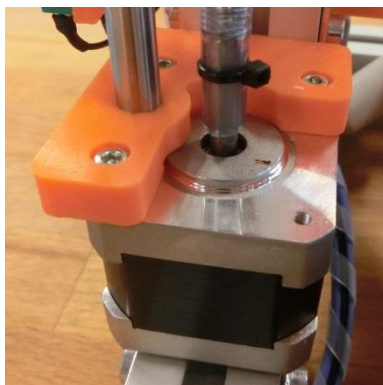


Obr. 21. Popis tiskové hlavy

Osa Y - směr zezadu dopředu. Osa Y se skládá z nejdelších vodících tyčí, které slouží jako lineární vedení. Jedná se o indukčně kalené tyče s vyšší tvrdostí. Tyče jsou nasunuty v lineárních ložiskách, ty jsou zajištěny v držácích pro lineární ložiska a přišroubované ke spodní straně desky. Zde je uchycena i kostka držáku řemene Y. Na této ose se pohybuje stolek s vyhřívanou podložkou. Vyhřívaná podložka je přišroubována v rozích desky pojezdu Y. Rozlišení osy X a Y se pohybuje v rozmezí 5 μ m.

Osa Z - směr zdola nahoru. Zde se pohybuje portál s extruderem. Pohyb zajišťují dvě závitové tyče, protáhlé mezerou v tištěném profilu, spojené spojkou ke dvěma krokovým motorům o momentu 0,5 Nm. Uchycení obou krokových motorů zabezpečuje přišroubování k plastovému úchytu. Kabely od obou motorů Z také prochází mezerou

v profilu. Do pravého i levého pojezdu jsou vždy vtlačena dvě ložiska. Jedno ze shora a druhé ze zdola. Pojezdy osy Z jsou nasunuty na vodící tyče pojezdu osy X. Pravá stojka v ose Z nese držák zdroje, ve kterém se nachází zdroj. Levá stojka stejným způsobem drží pomocí šroubů držák elektroniky. Osa Z má teoretické rozlišení přibližně $0,3\text{ }\mu\text{m}$.



Obr. 22. Levý dolní úchyt



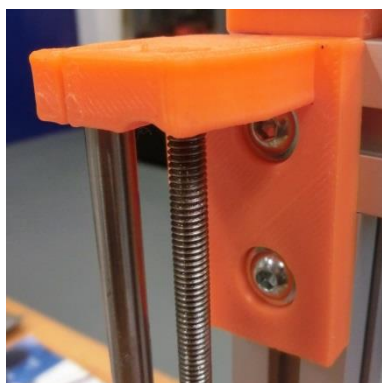
Obr. 23. Pravý dolní úchyt



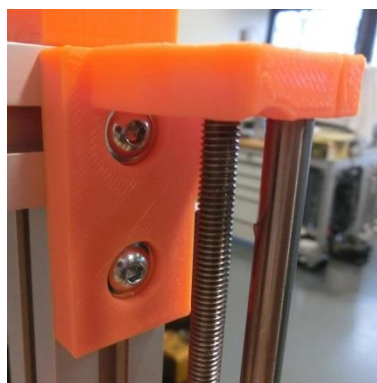
Obr. 24. Levý pojezd Z



Obr. 25. Pravý pojezd Z



Obr. 26. Levý horní úchyt



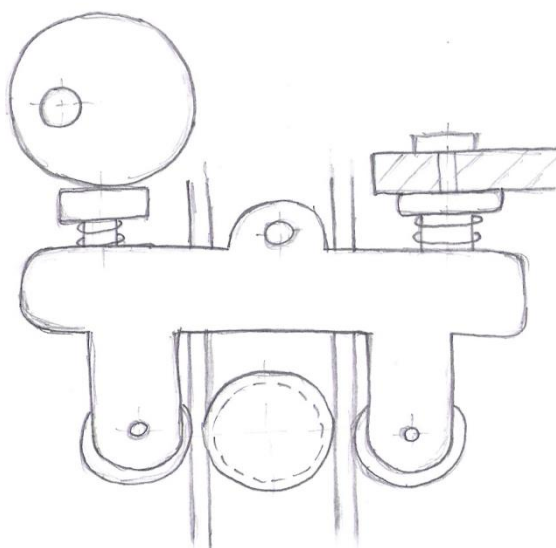
Obr. 27. Pravý horní úchyt

V horní levé části portálu je k hliníkovým profilům připevněn grafický displej s otočným voličem a nainstalovaný open source firmware Marlin. RAMPS 1.4 s IRF1404. Rozšiřující deska, která umožňuje připojení příslušenství 3D tiskárny (krokové motory, ventilátory, topné elementy, senzory, modul displeje) k desce Arduino Mega 2560. V pravé části portálu se nachází univerzální držák cívky, ze které filament putuje do tiskové hlavy. Držák se přizpůsobí každé velikosti cívky. Průměr tiskové struny je 1,75 mm. [35, 36]

7 TISKOVÁ HLAVA PRO DVA MATERIÁLY

Tato praktická část se bude zabývat optimalizací konstrukce tiskové hlavy pro dva materiály s možností využití co nejširší škály dostupných materiálů ve formě filamentu. Kapitola bude pojednávat o návrhu, výrobě, montáži a následně i o zhodnocení tiskové hlavy.

Návrh byl nejprve realizován jako skica na papír. Poté přišlo na řadu přenést myšlenku do virtuálního prostředí PC. Vlastní výroba jednotlivých dílů proběhla v závislosti na tom, zda se jedná o zakoupený díl nebo díl vyrobený, a to pomocí 3D tisku či třískovým obráběním. Nákup potřebných komponentů (šrouby, ložiska, pružinky, podložky, matky) proběhl přes internetový a kamenný obchod. Chladič, heatbreak, topný blok a tryska vycházejí z diplomové práce Návrh 3D tiskárny technologie FDM [37].



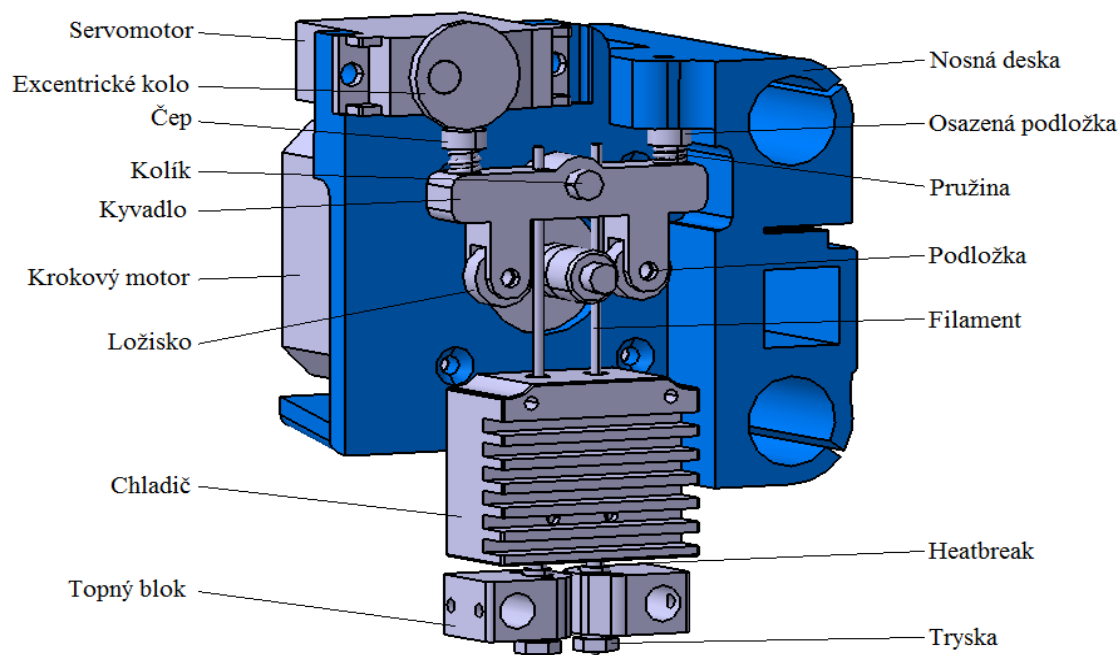
Obr. 28. Skica návrhu

7.1 Varianta 1.1

Virtuální model tiskové hlavy vznikl v softwaru CATIA V5R21. Tento software podporuje STL formát důležitý pro následný 3D tisk. Tisková hlava byla navržena pro dva tiskové materiály. Nové řešení vychází z části původní nosné plastové desky od výrobce 3D tiskáren REBEL 3D. Tato nosná základna tvoří nejobjemnější díl celé tiskové hlavy, které nese veškeré následující díly. Nosná základna byla navržena tak, aby díry pro posuvové tyče a průchozí díra pro řemen splňovali rozměrové požadavky z původní nosné desky a veškeré díly bylo možné vhodně u reálně vyrobeného dílu uchytit. V zadní

části dílu se nacházejí drážky pro uchycení řemenu. K vylepšení celkového vzhledu přispělo zaoblení některých ostrých hran modelu. Dále se sestava skládá z krokového motoru s podávacím kolem a malého servomotoru, na jehož hřídelce je uchycen výstředník neboli excentrické kolo. Krokový motor a malý servomotor jsou k nosné desce připevněny tak, aby v případě vibrací od motorů nedocházelo k přenosu nežádoucího kmitání. Servomotor byl uchycen pomocí šroubů s využitím úchytů na levé i pravé straně, které jsou k tomu určené. Krokový motor byl zajištěn v přední části také prostřednictvím šroubů. Prostor pod tímto motorem zajišťuje výztužné žebro nosné desky. Významná část – kyvadlo, uchyceno k nosné desce pomocí osazeného kolíku a zajištěno na druhé straně šroubem. Koncové části kyvadla disponují drážkami s vloženými ložisky a podložkami. Vůle mezi kyvadlem a osazeným kolíkem umožňuje snadnost výkyvu kyvadla. Levá strana kyvadla disponuje s pružinkou navlečenou na čepu, který je usazen v díře pod excentrickým kolem. V pravé části se nachází pružinka navlečená na osazené vložce, která je zároveň přišroubovaná k nosné desce.

Otočení výstředníku určuje polohu kyvadla a tedy funkci celého mechanismu. Směr vykývnutí kyvadla udává, který materiál se bude natavovat. Pokud se výstředník otočí o takový úhel, aby se pružinka pod tímto kolem stlačila, kyvadlo na levé straně sníží polohu o několik stupňů. Pravá strana kyvadla naopak bude vytlačena nahoru, kde proběhne také stlačení pružinky. Tento výkyv zapříčiní přitlačení filamentu ložiskem k podávacímu kolu. Filament před přitlakem nejprve prostupuje dírami v kyvadlu směrem k ložiskům a podávacímu kolu, dále do heatbreaku, který je z části obsažen v chladiči. Přítlak pro pravý filament je vyvozován velmi obdobně. Tisková struna je v CAD modelu vymodelována jen pro názornou ukázkou a pro lepší představu kudy bude postupovat. Následují topné bloky a na závěr trysky. Chladič je stejně jako oba motory uchycen k nosné desce pomocí šroubů. Abychom předcházeli zahřívání chladiče od krokového motoru, byl chladič situován do nižší části od krokového motoru. Veškeré vymodelované díly v CAD sestavě mají šedou barvu mimo nosné desky, což vystihuje barva modrá.



Obr. 29. Návrh tiskové hlavy v softwaru CATIAV5R21

7.1.1 Tisk plastových částí

Po vymodelování prvního návrhu v CAD softwaru mohl přijít na řadu samotný 3D tisk potřebných plastových dílů. Jedná se o dva díly ze sestavy vytlačovací hlavy - nosná deska a kyvadlo. U 3D modelu v softwaru CATIA V5R21 proběhlo k uložení do formátu STL, který podporuje 3D tisk. V první řadě bylo zapotřebí importovat data do softwaru CatalystEX. V tomto programu následovala úprava dat pro samotný 3D tisk, tj. nastavit tloušťku jedné vrstvy, způsob vyplnění modelu, určit nejvhodnější pozici dílů, počet kusů, STL jednotky, měřítko a vygenerování podpůrného materiálu.

Po zapnutí 3D tiskárny se vykonalo automatické zkalibrování. Před spuštěním tisku se nechala komora tiskárny zahřát na tiskovou teplotu. Hranice tiskové teploty v komoře se udává hodnota 70°C, od které je možné tisknout. Zahřátí na tuto teplotu trvalo několik málo minut. Načež následovalo zadání pokynů řídicímu softwaru. Použité zařízení Dimension SST 768 pracuje na principu technologie Fused Deposition Modeling s přesností přibližně 0,1 mm.



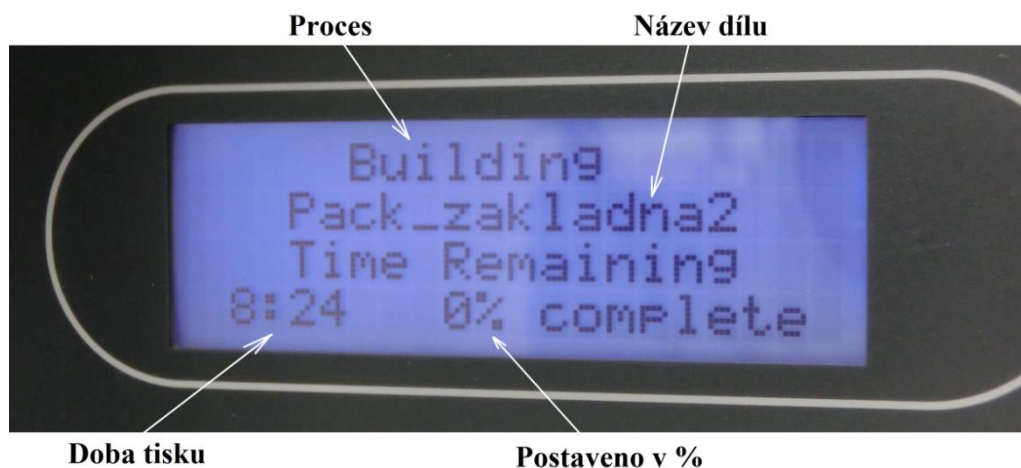
Obr. 30. 3D tiskárna Dimension SST 768

Jako podpůrný materiál byl použit originální materiál od firmy Stratasys P400SR Soluble Support, barvy černé a jako stavební materiál ABS zastoupen červenou barvou.

Tab. 3. Vlastnosti tiskového materiálu ABS [38]

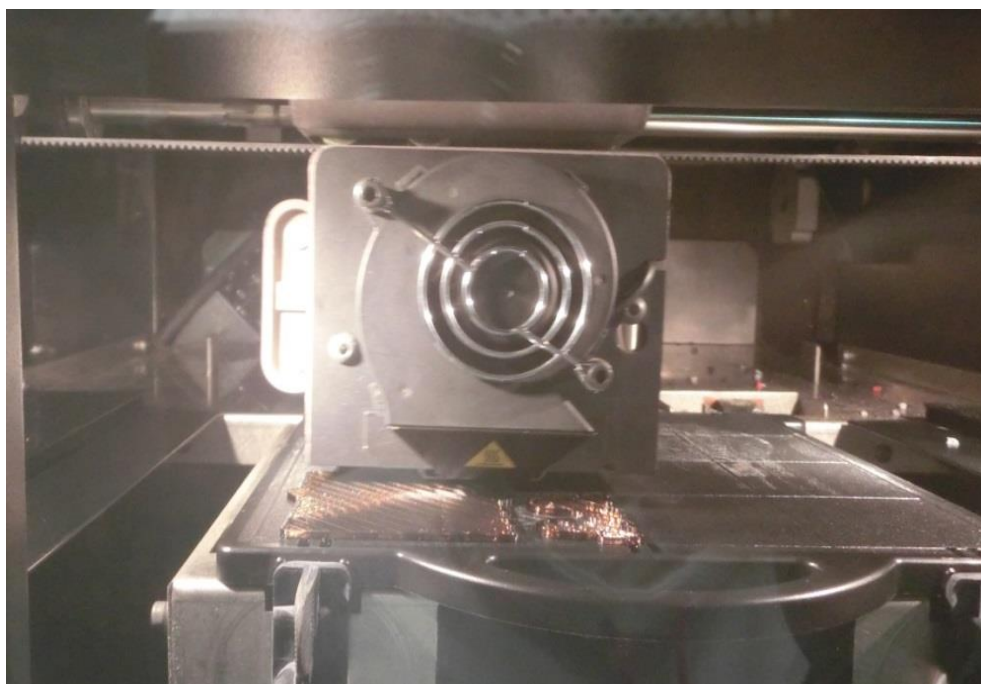
Název	Akrylonitrilbutadienstyren
Hustota	1050 kg/m ³
Množství vlákna na 1kg cívce	952 cm ³
Délka	400 m
Průměr	1,75 mm
Teplota tisku	220–240°C
Teplota extruderu	220–275°C
Teplota podložky	100–130°C

Doba tisku trvala 8 hodin a 24 minut. Tento čas bylo možné sledovat na displeji samotného zařízení, kde se zároveň zobrazuje stádium stavby vyjádřené v %.

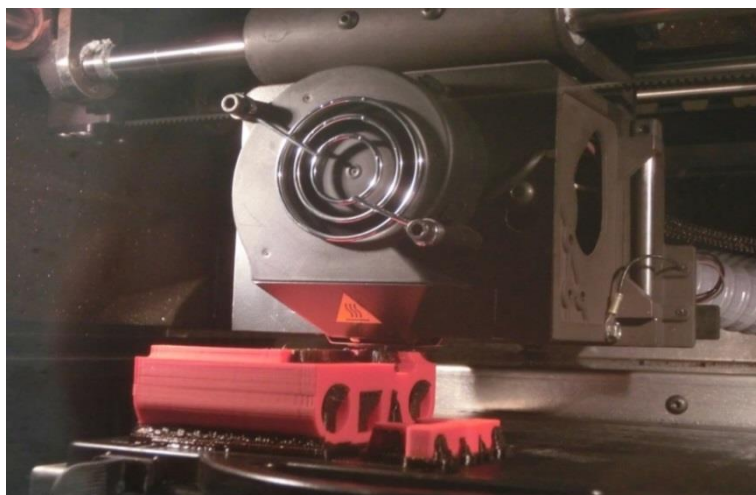


Obr. 31. Display na zařízení Dimension SST 768

V první řadě proběhlo vytisknutí vyrovnávací podložky pod oba díly, barvy černé. Tato podložka obsahuje 10 nanesených vrstev materiálu a slouží k vyrovnání případných nerovností na stavební desce. Na Obr. 32. je již vytisknuta vyrovnávací podložka a patrný počátek tisku z materiálu ABS, barva červená.



Obr. 32. 3D tisk vyrovnávací podložky



Obr. 33. 3D tisk základní desky a kyvadla

Mezi změnami tiskového materiálu se tisková hlava odjížděla otírat trysku o kartáč umístěný nedaleko od tiskového prostoru. Po dokončení tisku proběhlo rozpuštění podpůrné konstrukce a vyrovnávací desky ve vodním roztoku hydroxidu sodného. Rozpuštění materiálu P400SR Soluble Support proběhlo během 12 hodin.

7.1.2 Výroba obráběných dílů

Mezi obráběné díly spadal chladič, tryska, kolík, osazená vložka a dvě podložky, trysky, topné bloky, heatbreaky. Jako vyhovující materiál pro chladič a posléze i pro ostatní díly byl zvolen dural. Pouze trysky jsou z mosazi. Výroba obrobených komponentů se realizovala na obráběcím centru MAZAK Integrex 100-IV pomocí třískového obrábění.



Obr. 34. MAZAK Integrex 100-IV

Do zásobníku nástrojů bylo nutné vložit vhodné nástroje a následně provést kalibraci. Doba obrábění chladiče trvala kolem 60 minut. Posléze proběhlo začištění zadní části pomocí frézky EMCO VMC-100. Po dokončení obrábění bylo nezbytné závitníkem dodělat závity v jednotlivých dírách, popřípadě upravit průměry děr pomocí výstružníku. Obrábění kolíku, osazené vložky a podložek proběhlo na soustruhu EMCO TURN 120.

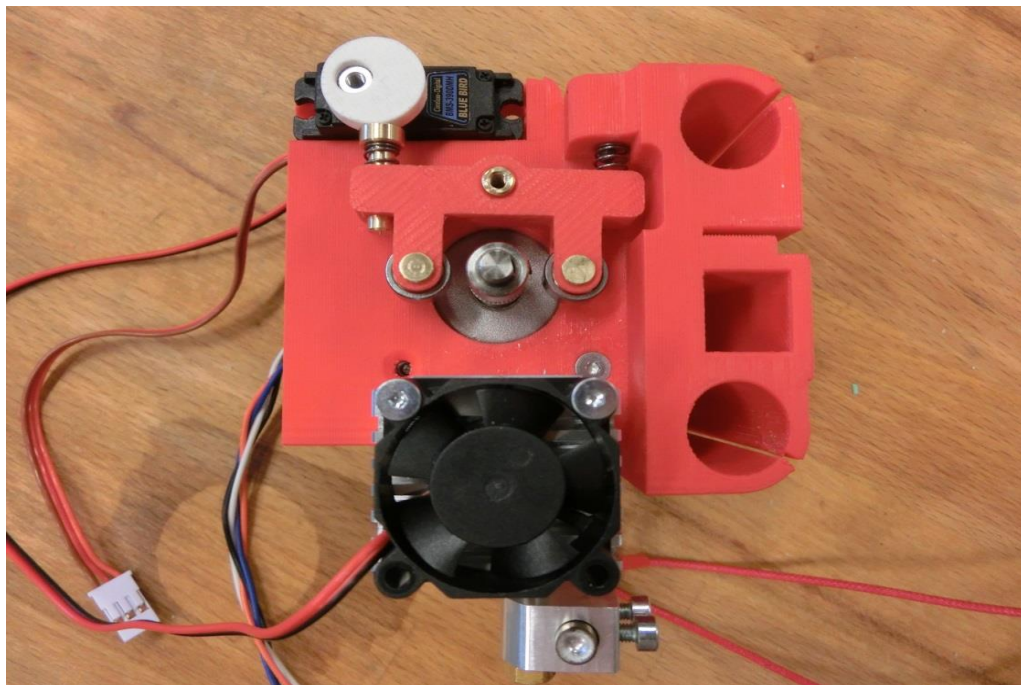


Obr. 35. Průběh obrábění chladiče

7.1.3 Montáž

Krokem číslo jedna bylo připevnění chladiče a kolíku k základní desce, důvodem jsou díry pro šrouby situované pod motorem. Další krok znamenal připevnění ventilátoru na obrobený chladič, heatbreaky, topný blok a tryska na závěr. Vzhledem k již zašroubovaným šroubům pro chladič a kolík ukrývajících se v prostoru pod motorem, mohl následovat samotný motor, na jehož hřídel se přišroubovalo podávací kolo. Konkrétně se jednalo o krokový motor řady SX17 NEMA17 s číslem 1005. Již připravený kolík zajišťoval kyvadlo, kde se na každé straně upevnilo přítlačné ložisko 623 ZZ o vnějším průměru 10 mm, vnitřním průměru 3 mm a šířky 4 mm s podložkami o průměru 5 mm a šíří 0,5 mm. Tato montáž byla vzhledem k miniaturnosti jednotlivých dílů značně obtížná. Následovalo nasazení pružiny na osazenou podložku v pravé části kyvadla a uchycení k nosné desce. Obě pružinky disponují délkou 10,5 mm s průměrem 5,4 mm. Během modelování v CAD softwaru vznikla chyba, představující výchylku díry pro šroub o 1 mm. Do levé části kyvadla se umístila pružina s čepem. Nakonec byl dodán servomotor s excentrickým kolem, kde se kolo provizorně využilo z již fungující 3D tiskárny, které bylo pouze vmáčknuto na hřídelku. Ovšem průměr nevyhovoval požadavkům této tiskové

hlavy. Osa excentrického kola a čepu nebyla v jedné rovině. Na úplný závěr bylo provedeno upevnění elektrických kabelů pro elektroniku. Technické parametry použitého krokového motoru uvedené od výrobce jsou patrné z Tab. 4.



Obr. 36. Tisková hlava - varianta 1.1

Tab. 4. Technické parametry krokového motoru X17-1005 [39]

Statický moment	0,52 Nm
Jmenovitý proud	1 A
Indukčnost	0,014 H
Odpor	5,9 Ω
Moment setrvačnosti rotoru	5,4 gcm ²
Hmotnost	0,3 kg
Délka kroku	1,8°
Tolerance kroku	±0,1
Izolační třída	NEMA B (130°)

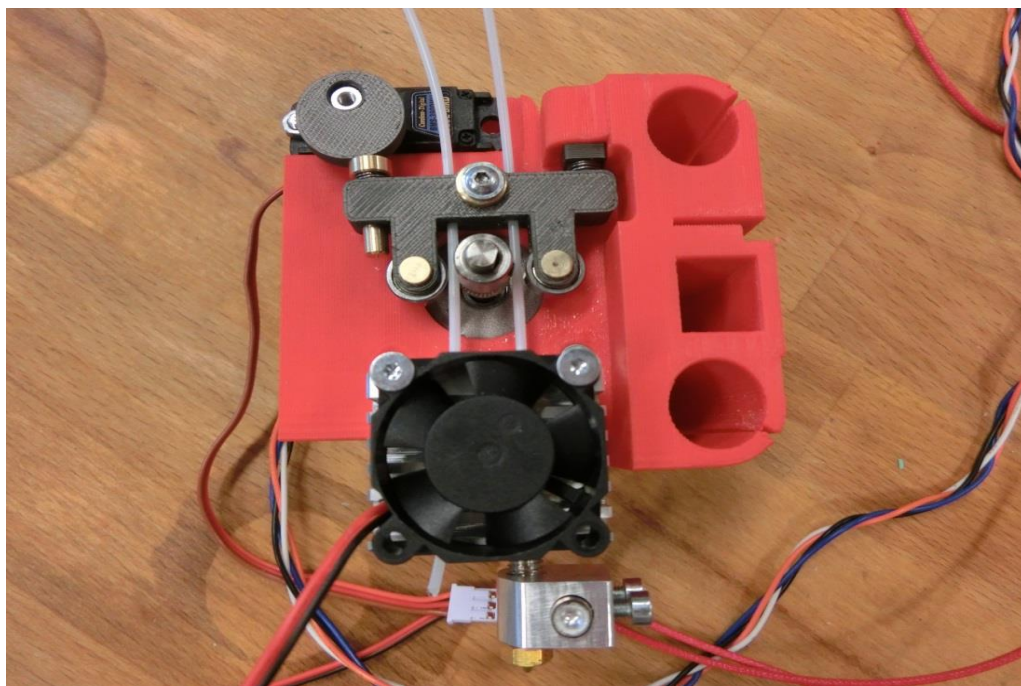
7.1.4 Zkouška a vyhodnocení varianty 1.1

Zkouška sestavené tiskové hlavy proběhla provizorně mimo 3D tiskárnu, ovšem s připojením na toto zařízení. Komunikace s řídicím PC proběhla bez jakýchkoliv potíží. Odvíjený filament z cívky se bezproblémově odvíjel a prostupoval skrz kyvadlo do chladiče k následnému natavení. I průchodnost tryskou byla bezchybná. Nejprve byl pro zkoušku použit filament o průměru 1,75 mm z ABS materiálu, poté byly odzkoušeny i filameny jiných průměrů i z jiných materiálů. Velký problém představoval nedostatečný přítlak filamentu mezi podávacím kolem a ložiskem. Vyvozovaný přítlak od excentrického kola sice umožnil chod jednoho nebo druhého filamentu, ovšem zcela správná funkce mechanismu znamenala zajištění dostatečného přítlaku.

7.2 Varianta 1.2

Tato modifikace varianty 1.1 se odlišovala kyvadlovou částí. Koncové části kyvadla byly posunuty blíže k sobě o 2,12 mm. Zmenšením mezery mezi podávacím kolem a ložisky bylo předpokládáno zvýšení požadovaného přítlaku, a tím zlepšení funkce mechanismu. Vložené podložky pod ložisky byly z důvodu předchozí komplikované montáže vypuštěny a místo nich byly vymodelovány přímo na CAD modelu kyvadla. Kyvadlo a excentrické kolo byly znovu vytištěny na 3D tiskárně Dimension SST 768 s totožným materiálem.

I přes změnu velikosti mezery pro filament, tedy mezi ložiskem 623 ZZ a podávacím kolem s vhodným poloměrem excentrického kola, nedosahoval přítlak takových hodnot, jakých bylo zapotřebí. Nevýhodou tohoto řešení představovalo působení pružin proti sobě. Nepodstatnou změnou bylo vytištění excentrické osazené vložky pro zajištění souososti pružiny a díry. V obou variantách, jak ve variantě 1.1, tak i ve variantě 1.2, příčinou nepřesnosti tisku nebylo možné provést zkušební uchycení řemenu do nosné desky. Další vadou na základní desce byla příliš tenká stěna u levé díry pro šroub pro servomotor. Všechny ostatní díly zůstaly stejné z původní verze.



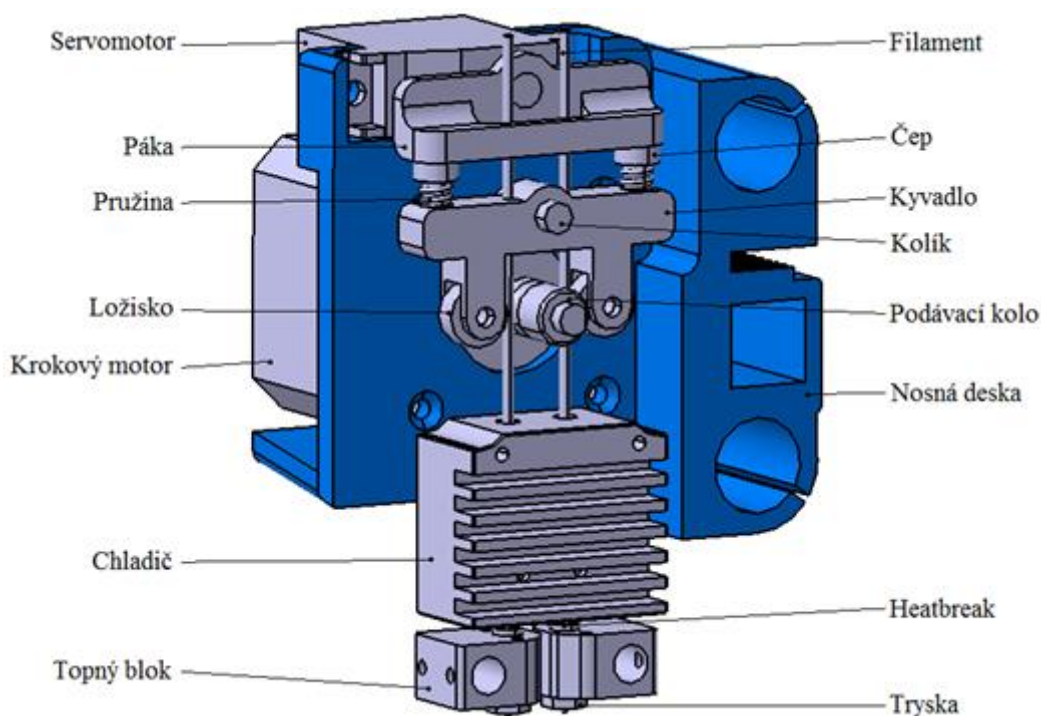
Obr. 37. Tisková hlava - varianta 1.2

7.3 Varianta 2.1

Pro bezchybnou funkci celého mechanismu bylo třeba změnit dosud navrhované řešení. Bylo třeba předložit návrh, který umožní vylepšení silových poměrů u obou pružin. Nevýhodou předchozích variant bylo pevné uchycení pravé pružiny k základní desce, na kterou nepůsobil žádný díl přítlačnou silou. Pro stlačení levé pružinky se pootočilo kolo, kyvadlo reagovalo vychýlením z rovnovážné polohy, tedy stlačením a zároveň proběhlo stlačení i pravé pružinky o základní desku. V opačném směru pootočení výstředníku tak, aby se kyvadlo se vychýlilo, se stlačila pouze pravá pružinka a levá pružinka zůstala v nulové poloze. Předchozí varianty dobře fungovaly pouze pro levou stranu.

U nové varianty 2.1 bylo excentrické kolo odstraněno a nahrazeno pákovým dílem uchyceným na hřídelce servomotoru. Samotný servomotor byl otočen o 180° . Pomocí nově navrhnuté páky dojde k zajištění souměrného stlačování obou pružinek navinutých na čepech. Při návrhu této pákové součásti byl kladen důraz na konstrukci dílu tak, aby nezamezoval cestu odvíjenému filamentu z cívky postupující do trysky. Kyvadlo z předchozího návrhu prošlo také změnou. Pravá strana kyvadla byla pozměněna jako kopie levé strany dílu. Změnou prošla i základní nosná deska vzhledem k novému uspořádání sestavy. Mezera pro uchycení řemene byla rozšířena o jednu desetinu

milimetru, předpokládají se nepřesnosti během tisku. Všechny ostatní díly jako chladič, heatbreaky, tepelné bloky, trysky, kolík, čepy, pružinky, ložiska 623 ZZ, filamenty, podávací kolo, krokový motor X17-1005 i Midi servo Bluebird BMS390 DMH byly převzaty z původního CAD modelu.



Obr. 38. CAD model varianty 2.1

7.3.1 Výroba chybějící dílů po variantu 2.1

Jelikož došlo ke změně základní nosné desky, kyvadla a k vytvoření nového pákového dílu, bylo třeba zajistit nový tisk těchto komponentů. K realizaci tisku byla použita identická 3D tiskárna Dimension SST 768 s materiálem ABS, barvy šedé. Barva nemá žádný vliv na vlastnosti tiskového materiálu. Vzhledem k úspoře materiálu i času, proběhl tisk základní desky prozatím ve zjednodušené verzi.

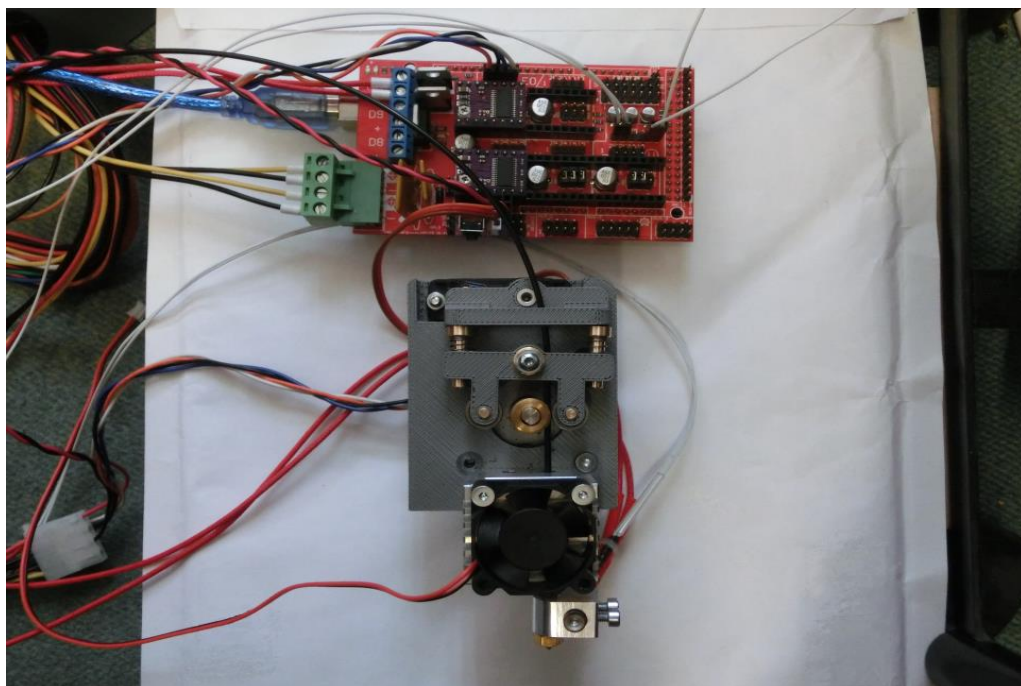
Čep z předchozí varianty, nacházející se na levé straně kyvadla, bylo možné znovu použít. Nově vložený čep v pravé straně kyvadla bylo nezbytné vyrobit. K výrobě posloužil soustruh EMCO TURN 120, zcela stejně jako u prvního čepu. Veškeré závity na dílech vznikly pomocí závitníku, popřípadě proběhla úprava děr prostřednictvím výstružníku. Nepřesnost při 3D tisku představuje důvod úpravy děr.

7.3.2 Sestavení varianty 2.1 a ověření funkčnosti

V okamžiku kdy byly veškeré díly k dispozici, mohla přijít na řadu vlastní montáž. Stejně jako u předchozích variant nejprve došlo k vmáčknutí motoru do otvoru a následné přišroubování podávacího kola na jeho hřídelku. Následný krok znamenal uchycení chladiče s ventilátorem. K chladiči byl zašroubován heatbreak s topným blokem a tryskou. Nad krokovým motorem X17-1005 se nacházelo kyvadlo s vloženými ložisky, pohybující se na osazeném kolíku, zajištěné šroubem. Na každé straně kyvadla byly do děr situovány čepy s navlečenou pružinou. Midi servo Bluebird BMS-390 DMH zaujímalo shodnou polohu s předchozími variantami. Výstředník nahradila páka, jejíž spodní plocha dílu dosedala na hlavy čepů.

Nejprve byla ručně vyzkoušena průchodnost filamentu a odvalování ložisek. Pro zkoušku byl využit znovu tiskový materiál ABS černé barvy. Po zapojení elektroniky, tedy zapojení krokového motoru, servomotoru a chladiče do řídicí desky Arduino a ke stolnímu PC, proběhla experimentální zkouška tiskové hlavy. V první řadě proběhlo v softwaru Repetier-Host určení servomotoru do středové polohy pomocí příkazu M340 P1 S1525. Písmeno P značí ID serveru a druhé písmeno S pulsy v μs . Z řídicího softwaru byl zaslán příkaz k natočení hřídelky servomotoru. Pro natočení na levou krajní polohu byl vyslán puls o hodnotě 620 μs a pro pravou krajní polohu hodnota 2200 μs . Toto natočení se projevilo vyvozením přtlaku ložiska na tiskovou strunu k podávacímu kolu. Maximální velikost úhlu pro natočení servomotoru je do 60°. Velikost přtlaku byla vynikající. Sestavený mechanismus neprojevoval žádné chyby v chodu odvíjeného filamentu. Průchod nahřívaného materiálu byl zcela plynulý.

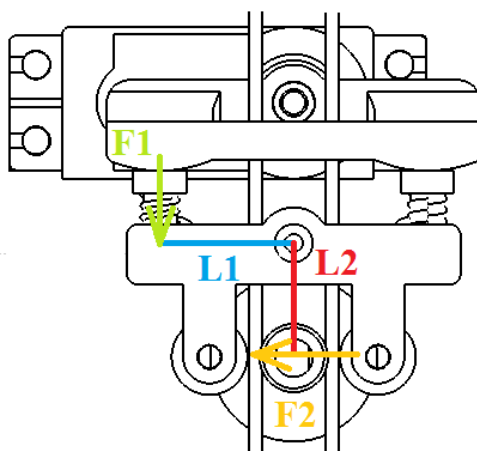
Menším nedostatkem se ukázala délka ramen páky, kdy při sklopení jedné strany nedosedala páka na celou plochu čepu. Ovšem po krátké době započalo zahřívání servomotoru. V případě zahřátého servomotoru dochází ke zpoždění plnění příkazů ze softwaru. Jeho součástí je tepelná pojistka, která v případě překročení referenční teploty provede vypnutí daného servomotoru. Pokud by teplota stále narůstala, mohlo by to vést až k přehřátí a tím k nevratnému poškození servomotoru. Příčinou zahřívání byly příliš vysoké vyvozované síly pro chod mechanismu.



Obr. 39. Tisková hlava - varianta 2.1 s připojením na řídicí desku Arduino

7.4 Varianta 2.2

Z výše uvedených důvodů v předchozí kapitole bylo nutné nakoupení silnějšího servomotoru. Dosahovaná síla na filament u předchozího servomotoru dosahovala 7 N. Servomotor je typicky využíván nanejvýš na 25 % svého momentu. Tedy 25 % z momentu 1,02 Nm, odpovídá 0,255 Nm. Z rovnic statiky bylo třeba vypočítat potřebnou sílu pro vyvedení páky z rovnovážné polohy pomocí servomotoru. Tento výpočet poskytl parametr pro vhodný výběr. Jedná se o momentovou rovnici k díře pro kolík, ze které byla vypočítána síla F_2 :



Obr. 40. Schéma působících sil

$$F1 \times L1 - F2 \times L2 = 0 \quad (1)$$

$$F2 = \frac{F1 \times L1}{L2} = \frac{14,5 \times 0,01765}{0,015} = 17 \text{ N} > 7 \text{ N}$$

F1 – působící síla od servomotoru [N]

F2 – působící síla na filament [N]

L1 – rozměr mezi působící silou F1 na čep a kolíkem [m]

L2 – rozměr mezi působící silou F2 na filament a kolíkem [m]

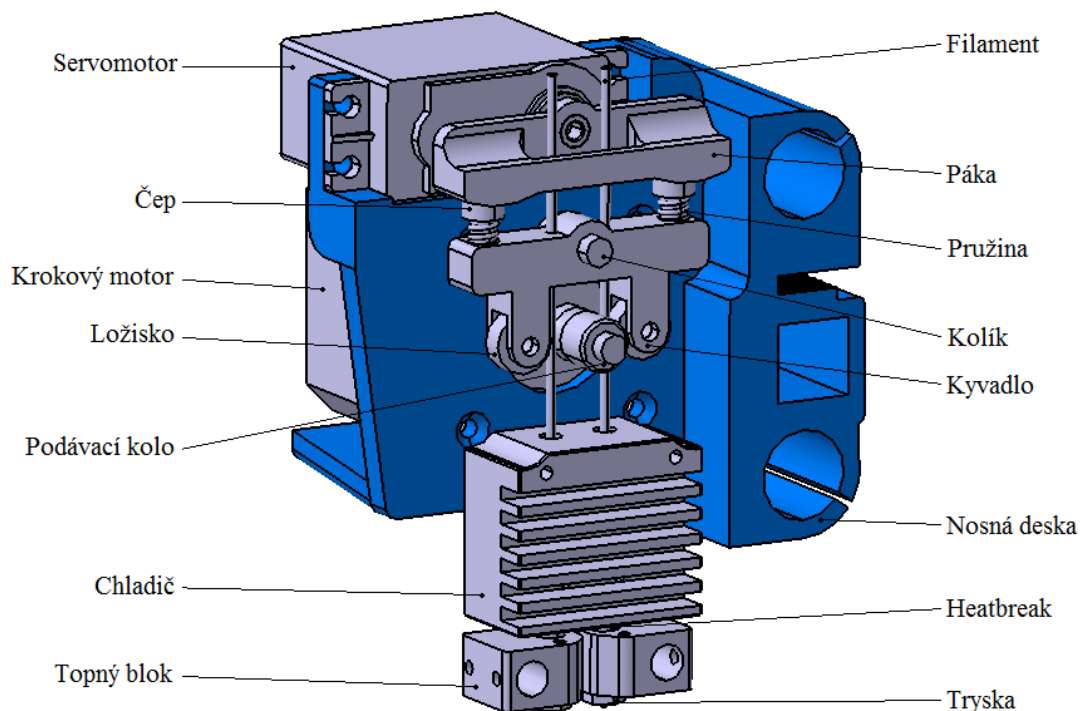
Technické parametry servomotoru MG996R od výrobce jsou patrné z Tab. 5. Novému, rozměrově většímu servomotoru bylo třeba uzpůsobit CAD model nosné desky. Hřídel servomotoru se nachází v ose kolíku i krokového motoru X17-1005.

Tab. 5. Technické parametry servomotoru MG996R [40]

Délka	40,7 mm
Šířka	19 mm
Výška	42,9 mm
Hmotnost	55 g
Moment (5 V)	1,02 Nm
Regulační doba (5 V)	0,155 s (60°)
Napájení	4,8 až 7,2 V
Pracovní teplota	0°C až 55°C

Menší úpravou prošel i pákový díl. Všechny ostatní díly CAD sestavy jako je chladič, heatbreaky, topné bloky, trysky, kolík, čepy, pružinky, ložiska, filamenty, podávací kolo a krokový motor X17-1005 jsou totožné s předchozím CAD modelem. Varianty 2.1 a varianta 2.2 jsou z velké části shodné. Veškeré změny na virtuálním modelu byly opět realizovány v softwaru CATIA V5R21. Modifikace páky představuje prodloužení levé i pravé strany o 3 mm. Předchozí model páky disponoval ve spodní části rovinou. To se ukázalo poněkud nevyhovující, ovšem neznamenal to zásadní nedostatek. Vychýlením páky pomocí servomotoru nebyla spodní plocha páky v trvale tečném styku

s vrchními plochami čepů. Z tohoto důvodu byla spodní část přemodelována s dvěma úsečemi o průměru 35 mm.

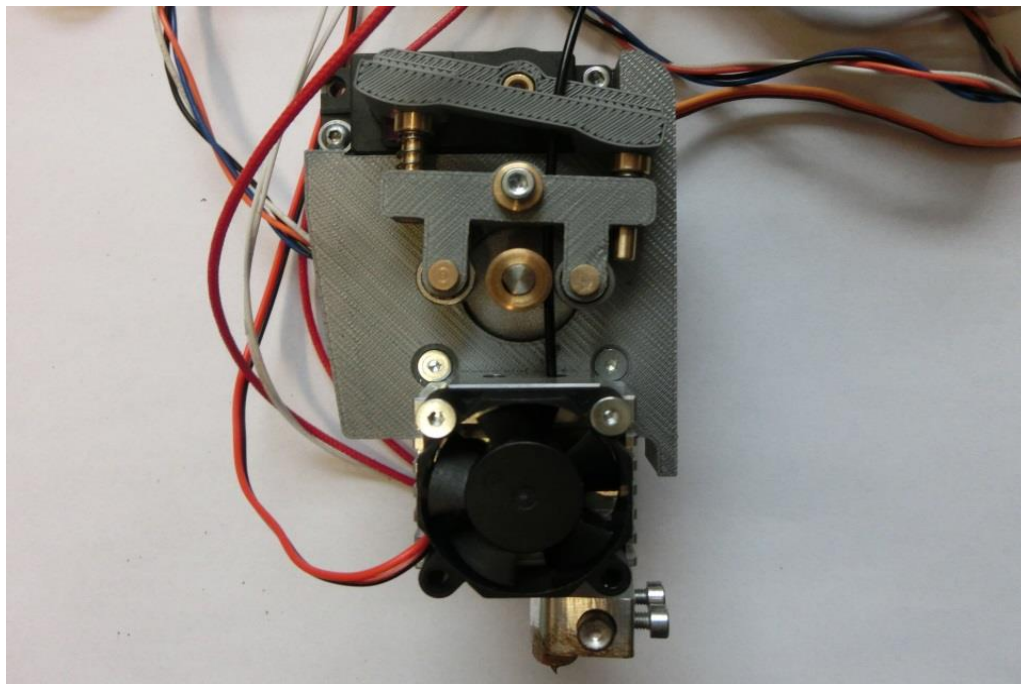


Obr. 41. CAD model varianty 2.2

Tisk upravených dílů proběhl na shodné 3D tiskárně s totožným materiálem. Nosná deska byla vytisknuta ve zjednodušené podobě pro úsporu materiálu. Montáž proběhla krok po kroku zcela stejně jako u varianty 2.1. Mimo páky a základní desky nebylo zapotřebí výroby jiných dílů.

Vlastnímu experimentu předcházelo ruční odzkoušení průchodnosti filamentu a následné připojení veškeré elektroniky, což znamenalo zapojení krokového motoru X17-1005, servomotoru MG996R a chladiče do desky Arduino a k stolnímu PC. Tisková hlava byla poté připravena pro experimentální zkoušku. Zkouška opět probíhala mimo 3D tiskárnu Rebel II. Nadefinování středové polohy nového servomotoru bylo realizováno prostřednictvím softwaru Repetier-Host pomocí stejného příkazu M340 P1 S1525 jako u předchozího servomotoru. Pomocí softwaru proběhlo natočení hřídelky servomotoru. Pro natočení do levé krajní polohy páky byl vyslán puls o hodnotě 620 μ s a pro pravou krajní polohu hodnota 2200 μ s. Natočení hřídelky vyvolalo přítlak ložiska na tiskovou strunu k podávacímu kolu. Maximální velikost úhlu natočení do 60°. Velikost přítlaku dosahovala požadovaných hodnot. Dráha odvíjeného filamentu nebyla nijak narušována jakýmkoliv jiným dílem sestavy. Páka jak z hlediska délky tak i tvaru spodní plochy také vyhovovala.

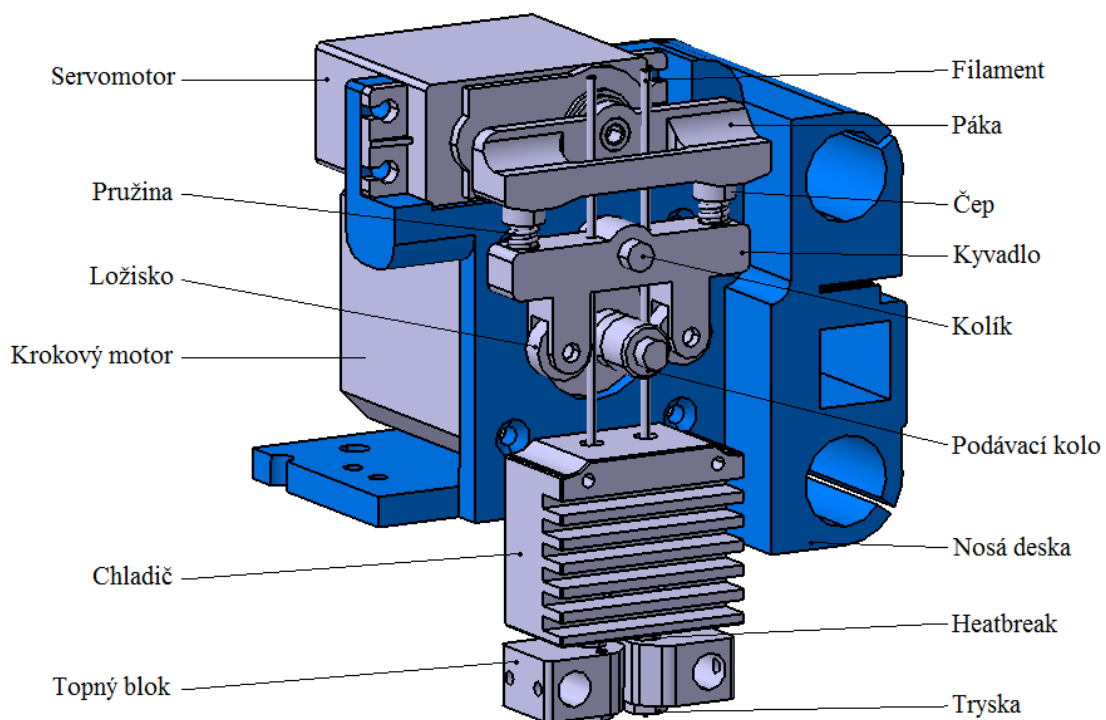
V průběhu naklápění byl stále vytvářen styk mezi vrchní plochou čepu a spodní plochou páky. Funkce tiskové hlavy byla označena za zcela vyhovující.



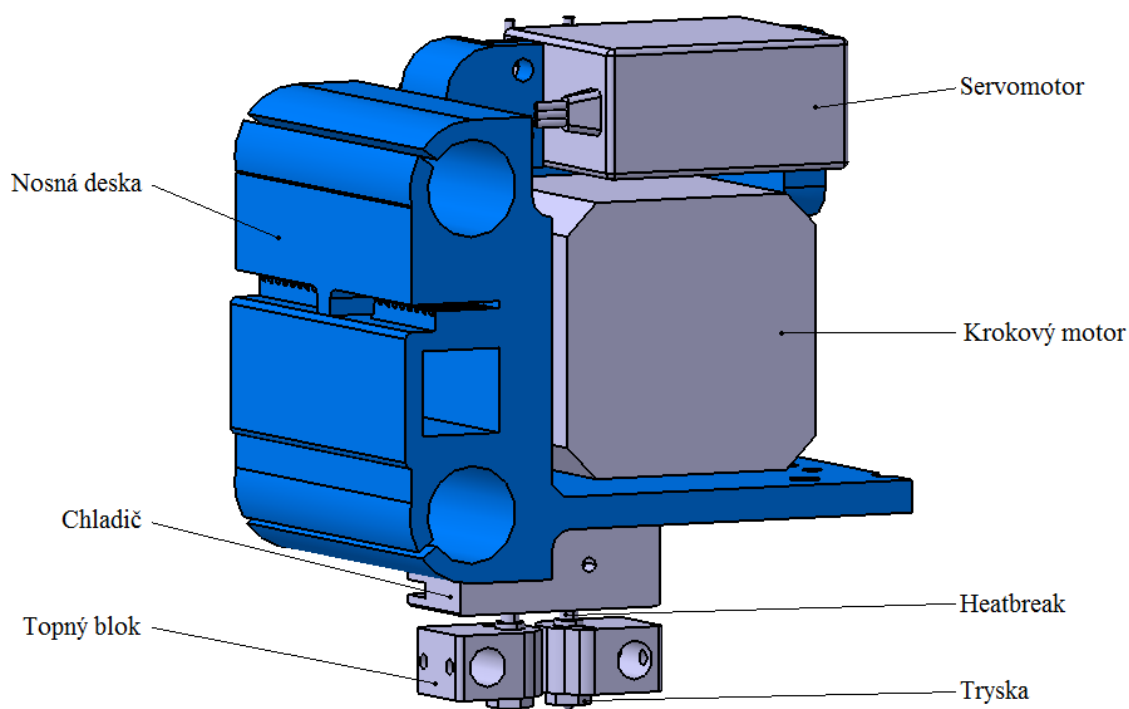
Obr. 42. Tisková hlava - varianta 2.2

7.5 Varianta 2.3

Jediné co stále chybělo modelu, respektive nosné desce, bylo vymodelování uchycení pro energetický řetěz. Veškeré úpravy na modelu byly provedeny v softwaru CATIA V5R21. Koncová část energetického řetězu bude uchycena do levé spodní části modelu, následně se řetěz otočí o 180° a bude pokračovat vedle krokového motoru. K uchycení řetězu budou použity šrouby průměru 3 mm, pro které byly vymodelovány dvě díry. Poslední úprava znamenala vytvoření díry a zářezu do desky. Tato díra se zářezem je určena k uchycení elektrických kabelů pomocí zip pásku



Obr. 43. CAD model varianty 2.3 – přední pohled



Obr. 44. CAD model varianty 2.3 – zadní pohled

7.5.1 Tisk plastových úchytů

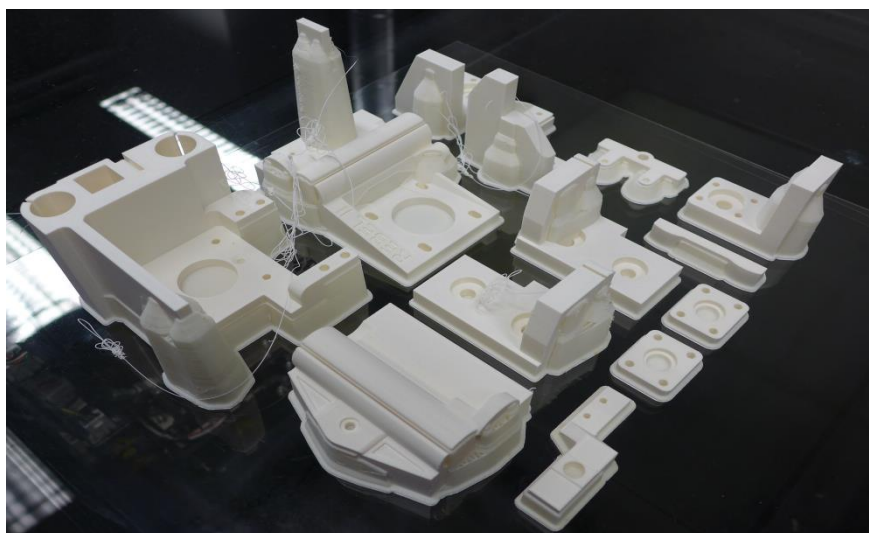
3D tisk proběhl na tiskárně Fortus 450mc od firmy Stratasys Ltd. Použitý materiál byl opět ABS. Před samotným tiskem byly do softwaru Insight naimportovány jednotlivé

díly, zde proběhlo nařezání po jednotlivých vrstvách, vygenerování podpůrné konstrukce a nastavení orientace tisku. Poté byla tato data převedena do softwaru Control Center, kde se umístila do prostoru zastupující tiskovou podložku. Spotřeba tiskového materiálu byla $189,88 \text{ cm}^3$, materiálu pro podpůrnou konstrukci $111,68 \text{ cm}^3$ a doba tisku přesahovala 40 hodin.



Obr. 45. Fortus 450mc

S díly pro tiskovou hlavu se zároveň tiskly díly pro následnou přestavbu konstrukce samotné tiskárny 3D Rebel II. Na Obr. 46 jsou výtisky na tiskové podložce po vyjmutí z 3D tiskárny před odstraněním podpůrné konstrukce. Podpůrná konstrukce byla odstraněna rozpuštěním v roztoku hydroxidu sodného. Sestavení tiskové hlavy proběhne již na samotné 3D tiskárně Rebel II.



Obr. 46. Vytištěné díly

8 ÚPRAVA KONSTRUKCE RÁMU TISKÁRNY

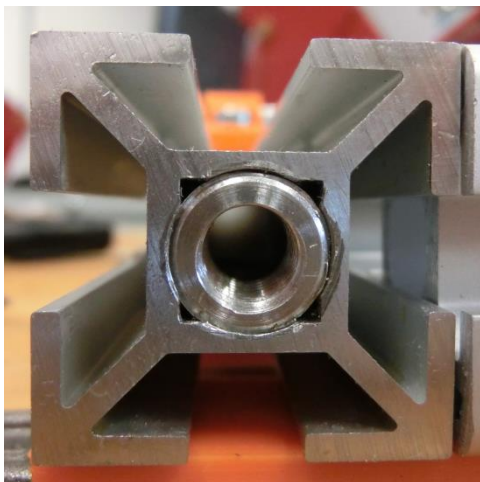
Tato kapitola se bude věnovat návrhu vhodné úpravy konstrukce rámu tiskárny s cílem dosažení vyšší kvality tisku a se zaměřením na bezpečnost provozu vlastní tiskárny (krytování, ochrana proti přehřátí a vzplanutí).

Detailní rozbor rámu 3D tiskárny je k dispozici v kapitole 5.1 Rozbor tiskárny Rebel II verze 32 edice Q. Záměrem této přestavby má být celkové zvýšení tuhosti konstrukce tiskárny. Původní závitové tyče v ose Z nebyly dostatečně uchyceny. Závitové tyče byly nahrazeny trapézovými šrouby. Při novém návrhu úchytů se vycházelo z původních dat od výrobce. Tyto plastové díly byly vytvořeny v softwaru CATIA V5R21. Stávající dva díly - levý a pravý pojezd Z byly pouze poupraveny jako STL data v softwaru GOM Inspekt. Realizace výroby proběhla prostřednictvím 3D tisku. Detailní nastavení tisku je uvedeno v předchozí podkapitole 7.5.1 Tisk plastových dílů. Konkrétně se jedná o horní pravý úchyt, horní levý úchyt, spodní pravý úchyt, spodní levý úchyt, pravý pojezd Z, levý pojezd Z a dvě pokličky. Vzhledem k původní oranžové barvě plastových dílů a bílé barvě nově vyrobených dílů bude patrné, které části tiskárny prošli změnou.

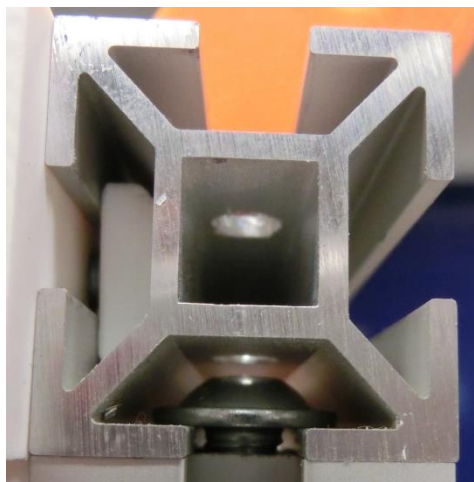
8.1 Přestavba tiskárny

Prvotním krokem bylo rozebrání stávající tiskárny, odpojení veškeré elektroniky. Výměna dvou závitových tyčí trapézovými šrouby, celková výměna tiskové hlavy a zajištění rámu konstrukce v rozích, což tedy znamenalo rozebrání téměř celé tiskárny. Vzhledem k zjištění některých nedostatků a chyb byly některé části přetisknuty na 3D tiskárně Dimension. Rozdíl je patrný v kvalitě použitého materiálu.

Rohy rámu konstrukce 3D tiskárny byly původně zajištěny plastovými vazbami rohů. Skrz tyto plastové rohy procházeli šrouby. Uchycení neposkytovalo dostatečnou pevnost. Při přenášení tiskárny hrozilo upadnutí spodní obdélníkové části rámu. Vazby rohů byly zrušeny a nahradily je šrouby zašroubované ve vložce disponující s vnějším i vnitřním závitem, našroubovaná ve čtvercové díře v hliníkovém profilu opatřená závitem. Vnější závit zajišťuje uchycení v hliníkovém profilu, vnitřní závit uchycuje šroub.



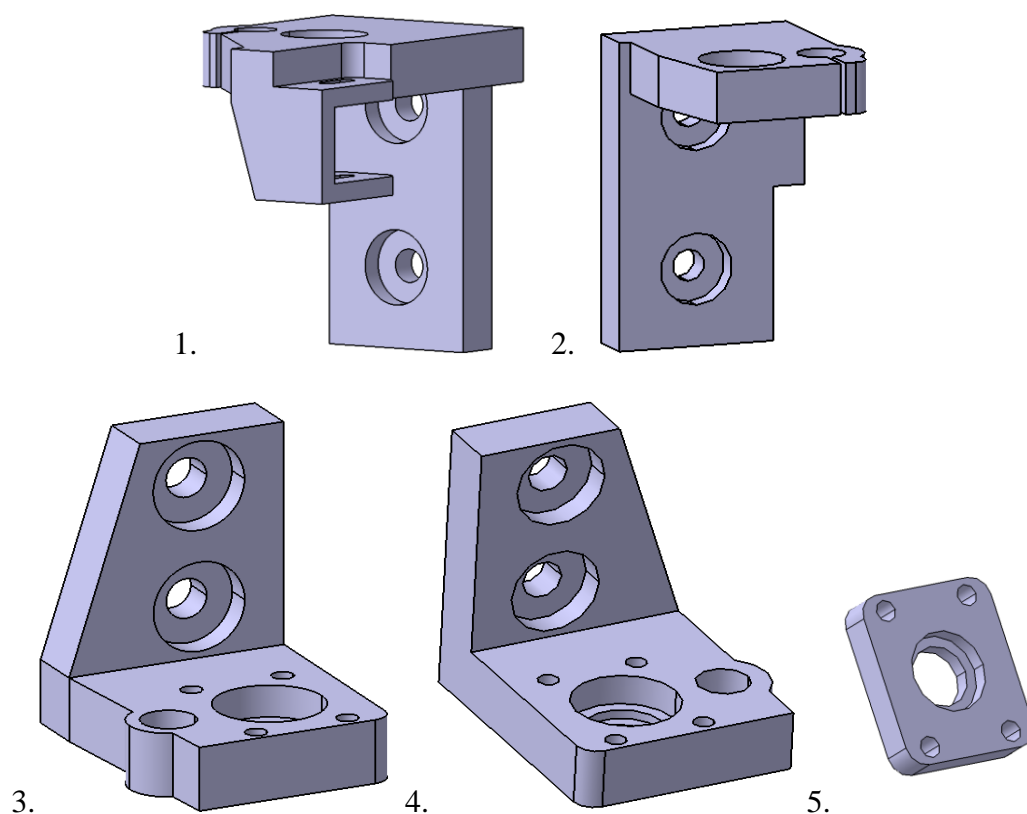
Obr. 47. Vložka v hliníkovém profilu



Obr. 48. Vložka se šroubem

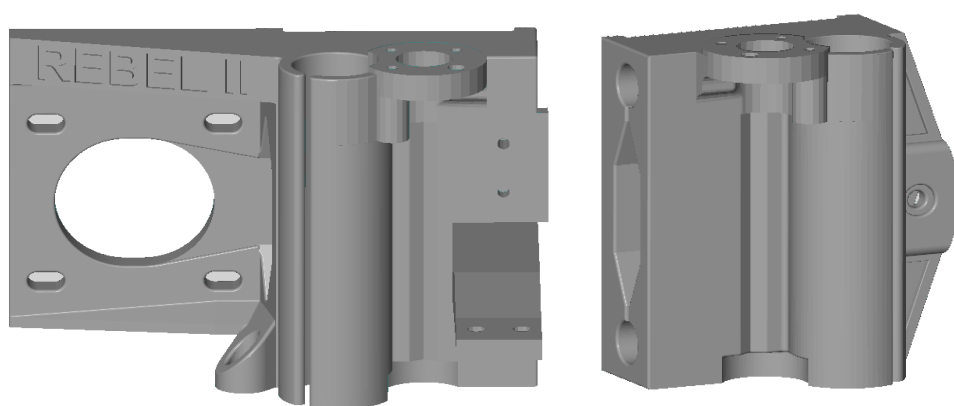
Přestavba pokračovala výměnou dvou závitových tyčí trapézovými šrouby o průměru 8 mm se stoupáním 10 mm v ose Z, každý na jedné straně rámu. Závitové tyče původně procházely skrz plastové pojezdy Z. Horní konec tyčí nebyl téměř zajištěn. Na dolním konci byly nasazeny do bužírky tvořící pružnou spojku s hřídelí motoru a zafixovány zip páskem. Uchycení pojezdových tyčí a trapézových šroubů proběhlo pomocí nově vytištěných dílů. Jak horní konec, tak i dolní konec trapézových šroubů je zajištěn proti pohybu ve všech třech osách. Před uchycením se trapézovým šroubům obrobilo osazení na obou koncích a osadily se kuličkovými ložisky. Uchycení zajišťuje pravý horní úchyt, levý horní úchyt, pravý a levý dolní úchyt s pokličkami. Pokličky slouží k zajištění polohy ložisek v axiálním směru.

Z důvodu hrubého stoupání šroubů se případným nepřesnostem v pohybu předchází propojením pomocí řemenu. Dostatečné napnutí řemenu je provedeno prostřednictvím rolny uchycené v levém horním úchytu. Pohyb v této ose umožňuje krokový motor, jedná se o tentýž model jako užívaný v tiskové hlavě. Délka hřídelky motoru byla zkrácena a osazena spojkou. Spojka prošla úpravou na obráběcím stroji, kde byl zmenšen její vnější průměr. Upraven musel být i levý dolní úchyt pro krokový motor, kterému se pozměnil tvar frézováním, pro nedostatečné místo pro spojkou.



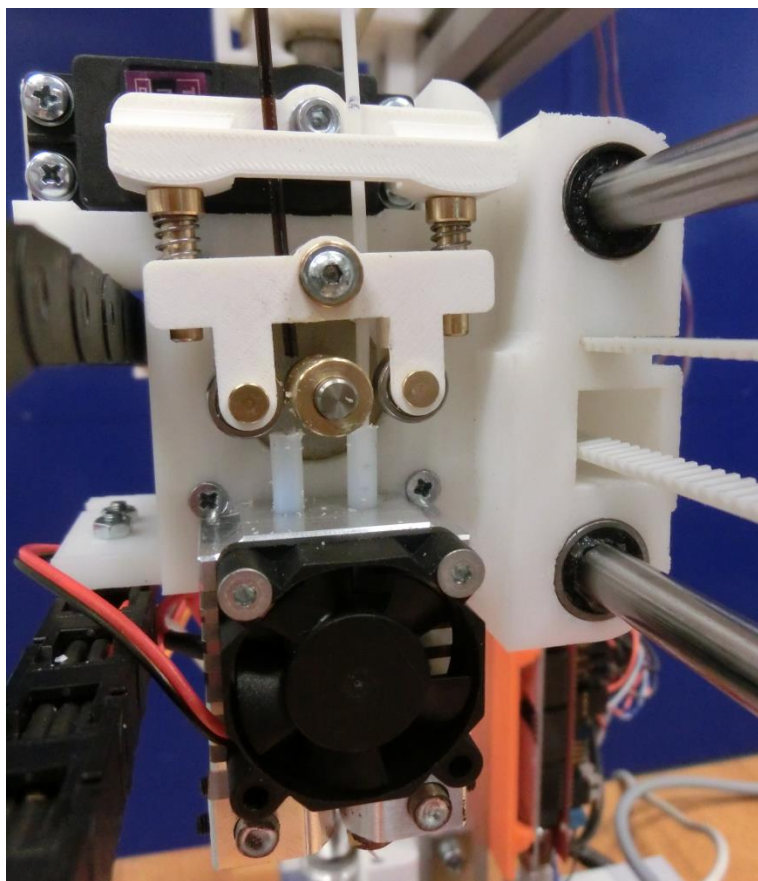
Obr. 49. Úchyty pro pojezdové tyče a trapézové šrouby - 1. horní levý úchyt, 2. horní pravý úchyt, 3. dolní levý úchyt, 4. dolní pravý úchyt a 5. poklička

Pojezdové tyče v ose X, což je osa pojezdu tiskové hlavy, nesou tiskovou hlavu. Do nosné desky tiskové hlavy byla vmáčknuta čtyři lineární ložiska. Každá díra obsahuje dvě. Tyto ložiska umožňují pohyb po pojezdových tyčích. Pojezdové tyče jsou uchyceny na každé straně rámu tiskárny do nově vytištěného levého a pravého pojezdu Z.



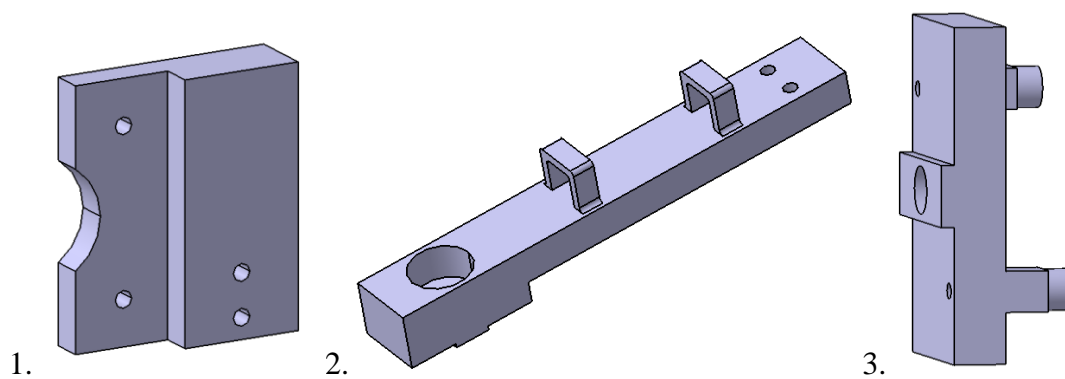
Obr. 50. Levý a pravý pojezd Z

Po uchycení nosné desky proběhla montáž tiskové hlavy. Průběh byl totožný jako u předchozí varianty. Do topného bloku se uchytilo topné těleso s termistorem.



Obr. 51. Tisková hlava pro dva materiály

Dále proběhlo uchycení řemenu T2,5 do nosné desky. Levý konec řemenu se uchytil v zadní části nosné desky, pokračoval v ose X k řemenici na levé straně, kde se otočil v protisměru, dále pokračoval v pravém směru, kde se znovu otočil o rolnu a zakončil opět v nosné desce. Uchycení obou konců řemenu bylo realizováno pouze vmáčknutím do zadní části tiskové hlavy. Poté byl k nosné desce přišroubován pravý koncový článek energetického řetězu. Řetěz se otočil o 180° a jeho levý koncový článek byl uchycen k levému pojezdu Z, který byl upraven pro tento účel. Energetickým řetězem byly vedeny veškeré elektrické kabely od tiskové hlavy, tedy od servomotoru, krokového motoru, termistoru, topného bloku, ventilátoru a tepelné pojistky. Energetický řetěz disponuje s 19 články se dvěma koncovými o délce 330 mm. Veškeré elektrické kabely vycházející z tohoto energetického řetězu pokračovaly do druhého rozměrnějšího energetického řetězu. Pro tento druhý energetický řetěz se navrhly a vyrobily dva nové plastové úchyty. Tento energetický řetěz obsahuje 11 článků s dvěma koncovými o celkové délce 282 mm.

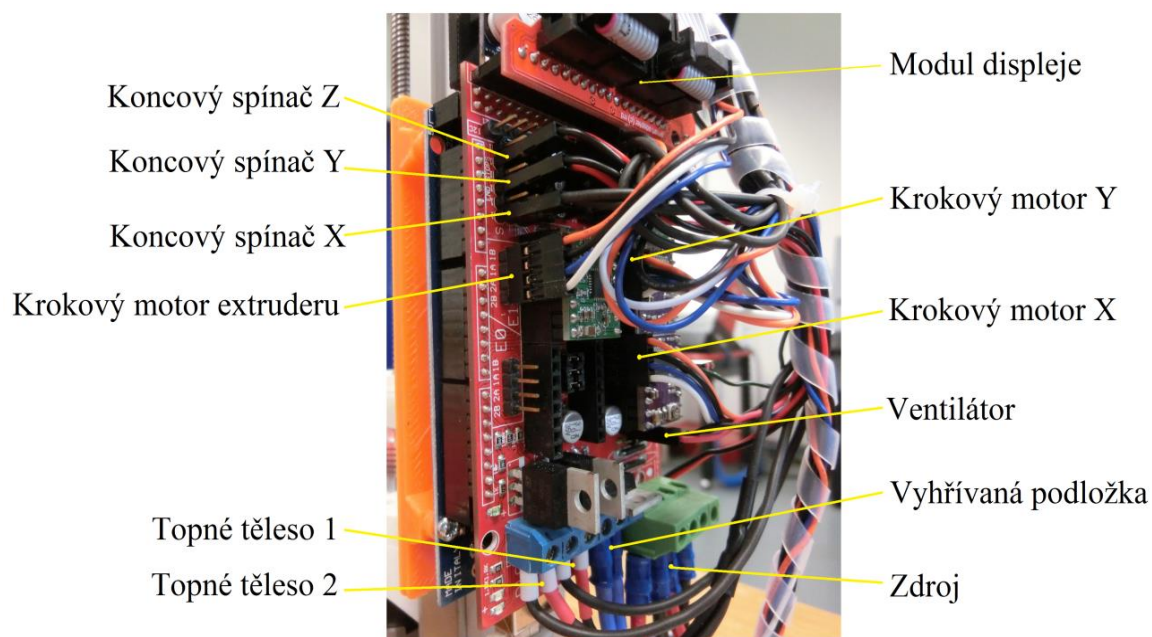


Obr. 52. 1. přední úchyt pro energetický řetěz, 2. zadní úchyt pro energetický řetěz
a 3. držák pro napájení servomotoru

První koncový článek uchycovaly šrouby v předním plastovém úchyty, který byl zároveň přišroubován v levém pojezdu Z. Následný druhý koncový článek, zajišťoval zadní plastový úchyt přišroubovaný v zadní části hliníkového profilu. Nad zadním úchytem pro energetický řetěz se nachází držák pro napájení servomotoru.

8.2 Zapojení elektroniky

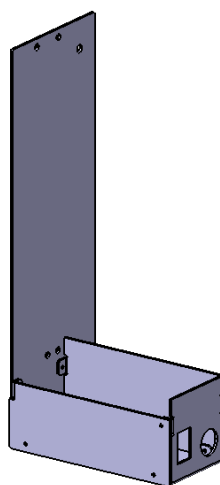
Rozšiřující deska RAMPS umožňuje připojení krokových motorů, topných těles, ventilátoru, modulu displeje, vyhřívané podložky, koncových spínačů, termistorů a zdroje k desce Arduino Mega 2560. Zapojení některých komponentů je zřetelné z Obr. 53. s popisem. Oba termistory a krokový motor pro osu Z byly zapojeny v horní části řídicí desky vedle koncových spínačů. Na každý konec kabelu byl nakrympován konektor. V případě nedostačující délky kabelů byly připájeny prodlužovací kabely. Spirálová bužírka sjednotila kabely do svazku.



Obr. 53. Zapojení elektroniky do řídicí desky RAMPS

8.3 Bezpečnost provozu tiskárny

Bezpečnost provozu 3D tiskárny se zaměřila na krytování, ochrana proti přehřátí a vzplanutí. Tiskárna před přestavbou tyto bezpečnostní prvky neobsahovala. Ochranu proti přehřátí zajišťuje tepelná pojistka připájená ke kabelům od topných těles, překrytá černou bužírkou. V případě překročení teploty dojde k rozpojení obvodu. Krytování na zdroji z nerezového plechu s tloušťkou stěny 1,5 mm zamezuje přístup a tím poskytuje bezpečnost obsluze i okolí. Virtuální návrh byl vytvořen v softwaru CATIA V5R21.



Obr. 54. Model krytu zdroje

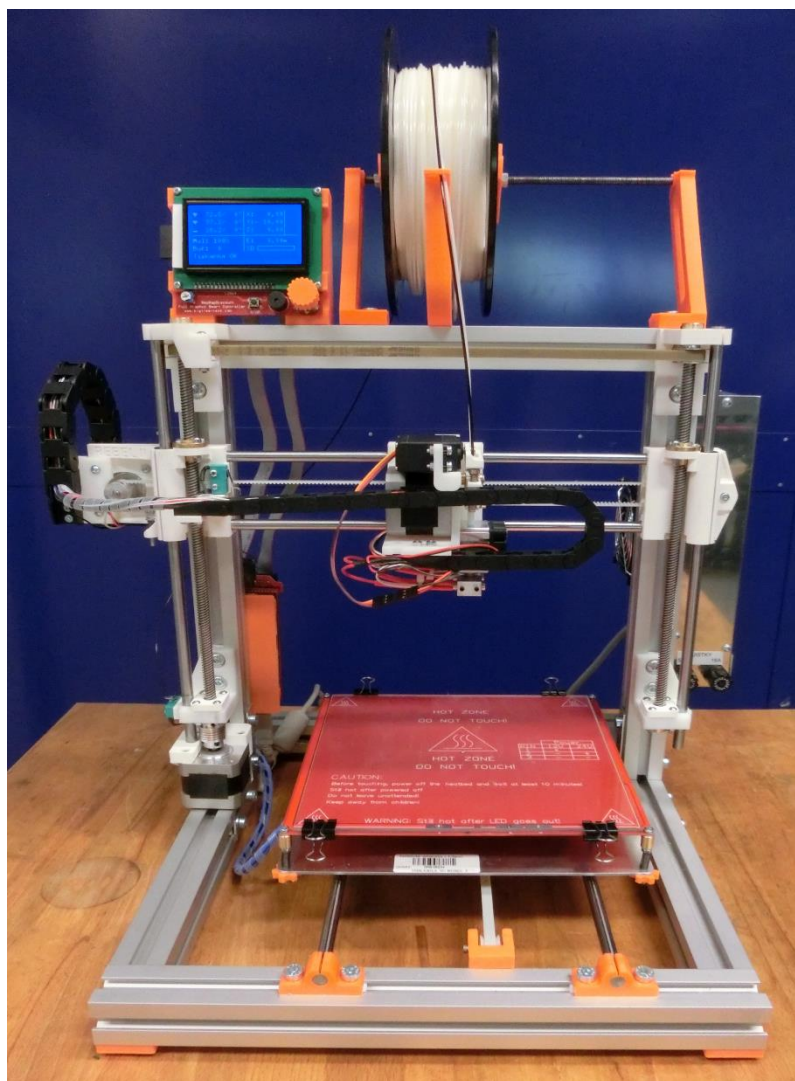
Nerezový plech byl vyřezán do požadovaného tvaru s potřebnými otvory. Hranatý otvor v přední části slouží pro vypínač a vedlejší otvor pro přívodní kabel 230 V. Otvor ve spodní části je určen pro elektrické kabely poskytující spojení s tiskárnou a oválné otvory jsou pro držáky pojistek. Dva otvory situované v pravé zadní části krytu poskytují uchycení k hliníkovým profilům a čtyři díry o menším průměru pro uchycení samotného zdroje. Vyřezaný tvar byl zohýbán do daného tvaru a pravoúhle ohnuté strany byly sešroubovány.



Obr. 55. Kryt zdroje

9 NASTAVENÍ TISKU A PROVEDENÍ EXPERIMENTŮ

Optimalizace 3D tiskárny Rebel II verze 32 edice Q byla již dokončena. Závěrem zbývalo nastavit veškeré parametry tiskárny a provést experimentální tisk před zařazením do běžného provozu.



Obr. 56. Optimalizovaná 3D tiskárna Rebel II

9.1 Nastavení firmwaru

Nastavení řízení 3D tiskárny poskytuje Repetier-firmware. Tento firmware umožňuje nastavení parametrů tiskárny ve webovém rozhraní. To znamená, že odpadá vytváření vlastního programu. Uživatel si pouze stáhne nakonfigurované soubory do svého počítače. Webové rozhraní Repetier-Firmware je rozděleno do osmi záložek. První záložka s názvem *Start* dále *General*, *Mechanics*, *Tools*, *Features*, *User Interface*, *Manual* a *Download*.

První záložka *Start* umožňuje načtení již dříve nakonfigurovaného firmwaru. To je vhodné pro uživatele, který má již nakonfigurovaný firmware a chce ho například poupravit. V případě, že chce uživatel konfigurovat nový firmware, klikne na ikonku *Next step*, tedy další krok.

V druhé záložce *General* se skrývá základní nastavení. Zde byl vybrán typ procesoru Atmel 8-bit based board s použitím modulu RAMPS 1.3/RAMPS 1.4. Příkazový řádek spouštěcího G-kódu se nedefinoval příkazem M340 P0 S1540. Rozměry tiskového prostoru byly nastaveny pro osu X 196 mm, pro osu Y 200 mm a pro osu Z 215 mm. Ostatních kolonky byly ponechány z výchozího nastavení.

Třetí záložka *Mechanics* se týká krokových motorů. Zde se nastavují hodnoty pro krokové motory ve všech třech osách. Pro krokové motory jednotlivých os jsou zde voleny hodnoty, jako je jejich maximální rychlost, zrychlení či rozlišení. Rozlišení udává kolik kroků je třeba pro posun o 1 mm.

V následující čtvrté části pod názvem *Tools* se nejprve nastavují převážně teploty ať už tiskové hlavy, tak vyhřívané podložky. Například minimální a maximální teplota extruderu pro různé případy tisku. V další sekci *Extruder* byl již nedefinovaný extruder s číslem 0, zde byla zapotřebí přidat druhý extruder s číslem 1. Zde je možné například nastavit použitý termistor či rozlišení. Tedy počet kroků motoru pro posun filamentu o 1 mm.

Pátá záložka *Features* umožňuje nastavení servomotoru. Povelání servomotoru umožní zaškrtnutí kolonky *Enable servo support* čímž dojde k rozbalení sekce *Servo configuration* Servomotor v tiskové hlavě označuje číslo 0 s pinem 11.

V pořadí šestá záložka *User Interface* poskytuje nastavení uživatelského rozhraní. V předposlední sedmé záložce *Manual* nalezneme okno s možností zapsání poznámek do konfiguračního souboru. Šestá a sedmá nebyla využita pro nastavení této 3D tiskárny. Poslední osmá záložka *Download* umožňuje stažení vygenerovaných souborů firmwaru. Tyto konfigurační soubory byly následně překompilovány do Arduina. Detailní nastavení firmwaru je k dispozici na přiloženém CD.

9.2 Nastavení a kalibrace 3D tiskárny

Nastavení tisku, popřípadě ovládání tiskárny probíhá prostřednictvím hostujícího programu Repetier-Host. Největší podokno programu poskytuje vizualizaci tiknutého

3D modelu v tiskovém prostoru tiskárny. Zde je umožněno model různě polohovat, názorně sledovat rozřezání modelu do jednotlivých vrstev či pozorovat průběh reálného tisku. Podokno v pravé části je rozděleno do čtyř záložek. V první záložce *Rozmístění objektu* probíhá nastavení polohy modelu s možností nastavení měřítka, duplikace, zarovnání či dělení. Následná záložka *Slicer* vybere nadefinovaný slicer. Třetí záložka *Print Preview* zadává příkaz k tisku a zobrazuje konkrétní informace o tisku. Mezi tyto informace patří časová délka tisku modelu, počet vrstev, řádek G-kódu a délka spotřebovaného filamentu v milimetrech. Čtvrtá záložka *Manuální nastavení* byla použita k manuálnímu ovládání tiskárny během kalibrace. Třetí podélné podokno ve spodní části zobrazuje komunikaci hostujícího programu s řídicí deskou 3D tiskárny.

Po úspěšném zapojení elektronky bylo možné vyzkoušet posuvy ve všech třech osách. Ovládání krokových motorů poskytl program Repetier-Host. Krokové motory se pohybovaly v ose X a Y dle očekávání, pohyb v ose Z bylo nutné kalibrovat. Rozměr mezi tryskou a sklem na vyhřívané podložce se kalibroval na rozměry tenkého papíru. Nejprve byla upravena výška vyhřívané podložky vůči jedné trysce. Druhá tryska byla následně nastavena do totožné výšky.

Parametr, důležitý k nastavení bylo rozlišení krokového motoru pro tiskovou hlavu. Nastavená hodnota pro počet kroků krokového motoru závisí na materiálu či na síle přitlaku. S vyšším číslem kroků bude prostupovat tiskovou hlavou více filamentu a naopak. Tato hodnota byla zjištěna pomocí jednoduchého experimentu. Na odvíjený filament se pomocí lihového fixu označila délka 50 mm a z řídicí desky byl vyslán požadavek na posunutí filamentu o 50 mm. Skutečně však bylo vysunuto 62,5 mm filamentu. Proto bylo třeba upravit původní konstantu počtu kroků na posuv o jeden milimetr délky, která byla 150 kroků/mm. Žádaná hodnota počtu kroků na posuv o jeden milimetr je dána původním počtem kroků násobeným podílem žádané a skutečné délky filamentu.

$$k_z = k_p \times \frac{l_z}{l_s} \quad (2)$$

$$k_z = 150 \times \frac{50}{62,5} = 120 \text{ [kroky/mm]}$$

k_z – žádaná hodnota počtu kroků na posuv o jeden milimetr [kroky/mm]

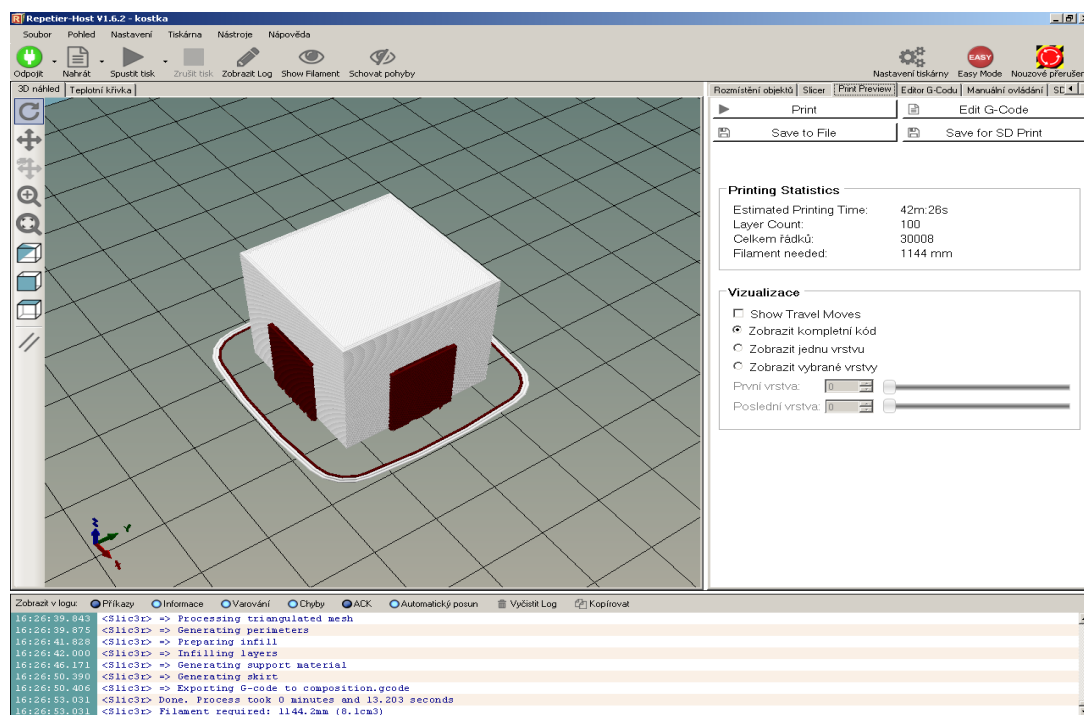
k_p – původní počet kroků na posuv o jeden milimetr [kroky/mm]

l_z – žádaná délka filamentu [mm]

l_s – skutečná délka filamentu [mm]

9.3 Zkouška tisku

Po veškerém nastavení potřebných parametrů bylo možné přejít ke zkoušce 3D tisku. Pro zkušební tisk byl navržen jednoduchý model. Model znázorňoval kostku o délce hrany 25 mm s vybráním ve spodní části. Úmyslně byla navržena členitá geometrie. Důvodem je odzkoušení jak stavebního materiálu, tak i podpůrného. Za stavební materiál byl použit ABS, podpůrný zastupoval materiál P400SR Soluble Support. Na obr. 57. zobrazuje stavební materiál – bílý a podpůrný materiál – hnědý.



Obr. 57. Repetier-Host

Při zkouškách průchodu nahřátého materiálu oběma tryskami nebyly patrné žádné nedostatky. Na funkci celé tiskové hlavy se neprojevovaly žádné defekty. Materiál plynule procházel skrz trysky. Pouhým okem bylo zřetelné otáčení hřídele krokového motoru a odvalování ložisek po odvíjení filamentu. V okamžiku, kdy se spustil konkrétní tisk modelu, vytlačený materiál nezůstával na vyhřívané podložce a hromadil se v okolí trysky. Dále množství materiálu neodpovídalo vytlačenému množství během zkoušek. Hrotem trysky procházelo mnoho násobně méně materiálu. Otáčení hřídele krokového motoru nepracovalo dle pokynů. Příčinou je pravděpodobně chybné nastavení firmwaru.

10 ZÁVĚR

Návrh a výroba tiskové hlavy ale i úprava konstrukce skrývala více úskalí, než bylo na první pohled patrné. Tisková hlava musela projít několika modifikacemi, než byla její funkčnost zhodnocena jako vyhovující. Největší problém představoval vyvozovaný přítlak na filament. Bez této přítlačné síly nemohl být realizován tisk. Prvotně se započalo s úpravou tiskové hlavy a poté se pokračovalo s úpravou konstrukce rámu 3D tiskárny. V průběhu přestavby konstrukce rámu tiskárny vznikaly montážní problémy, které byly úspěšně odstraněny.

Návrh tiskové hlavy pro dva filameny vycházel z původní tiskové hlavy pro jeden filament od výrobce 3D tiskárny Rebel II verze 32 edice Q. Byl zachován původní princip funkce tiskové hlavy. To znamená, že odvíjený filament postupuje přes podávací mechanismus do heatbreaku ochlazován v chladiči ventilátorem. Následně pokračuje do topného bloku, kde proběhne natavení pomocí topného tělesa a poté je vytlačen přes trysku na stavební podložku. Geometrie tvaru nosné desky byla uzpůsobena pro nový návrh, zachovala se pouze zadní část. Důvodem bylo ponechání roztečné vzdálenosti pojezdových tyčí v ose X a principu uchycení. První návrh tiskové hlavy zprvu působil jako vhodný mechanismus pro zajištění funkčnosti celé sestavy. Veškeré nově navržené komponenty tiskové hlavy, a později i díly pro přestavbu konstrukce tiskárny, byly vymodelovány ve virtuálním prostředí softwaru CATIA V5R21. Nosná deska, kyvadlo a excentrické kolo byly vyrobeny technologií 3D tisku. Zbývající komponenty jako chladič, topné bloky, heatbreaky a trysky byly obrobeny. První prototyp tiskové hlavy se projevil jako nefunkční. Levá strana mechanismu zajišťovala dostatečný přítlak na filament, ovšem pravá strana nikoli. Nevýhodou tohoto řešení bylo neustále působení tlačných pružin proti sobě. I přes úpravu tohoto řešení nebyl potřebný přítlak zajištěn.

Druhá navržená varianta také využívala principu tlačných pružin. Ovšem excentrické kolo na hřídeli servomotoru bylo nahrazeno pákou, která působila na dva čepy s pružinami. Tyto čepy se nacházely na každé straně kyvadla. Naklápění páky opět zajišťoval servomotor. S natočením hřídele se natočila i páka, která zapříčinila stlačení buď levé, nebo pravé pružiny a tím k vychýlení kyvadla z rovnovážné polohy. Vzhledem k souměrnosti daného řešení probíhal přítlak na oba filameny totožnou silou. Přítlak dosahoval žádané velikosti, ovšem problémem se ukázal slabý servomotor, který se začal přehřívat. S ohledem na nákup nového silnějšího servomotoru musela projít změnou

i nosná deska. U druhé varianty byly vytvořeny celkem tři modifikace, než se tisková hlava vyhodnotila za plně funkční.

Druhá fáze změn se zaměřila na konstrukci 3D tiskárny. Změny přispěly ke zvýšení celkové tuhosti konstrukce. Novou podobou prošlo uchycení pojezdových tyčí a trapézových šroubů v ose Z. Pravý a levý pojezd tiskové hlavy pro osu Z vycházel z původního uchycení od výrobce. Tyto dva díly se pouze poupravily a vytiskly. Novým způsobem bylo zajištěno uložení pojezdových tyčí a trapézových šroubů pomocí vytištěných úchytů. Veškeré použité elektrické kabely od použité elektroniky se sjednotili do dvou energetických řetězů. Zajištění proběhlo s použitým novým vytisknutým úchytům. Bezpečnost provozu poskytuje kryt z nerezového plechu na zdroji. Prevenci pro přehřívání poskytuje tepelná pojistka.

Po konstrukčních úpravách přišlo na řadu nastavení a uvedení tiskárny do provozu. Řídicí program byl po nastavení veškerých parametrů vygenerován webového rozhraní Repetier-Firmware. Veškeré ovládání probíhalo prostřednictvím firmwaru Repetier-Host. Zkušební model pro tisk byl navrhnout se složitou tvarovou geometrií. Zkoušky průchodu nataveného materiálu probíhaly bez potíží. Tisková hlava se pohybovala v ose X a Z bez defektů. Na mechanismu nebyli patrné žádné nedostatky. Na oba filameny byly vyvíjeny potřebné přitlačné síly. V případě výtisku konkrétního modelu vytlačený materiál nezůstával na vyhřívané podložce i množství bylo zcela nevyhovující. Příčinou bylo neodpovídající otáčení hřídele krokového motoru. To zapříčinilo nedostatečný přitlak na odvíjený filament. Pravděpodobnou chybou je chybné nastavení firmwaru. V experimentech tisku se nadále bude pokračovat. Cena optimalizace 3D tiskárny Rebel II přesahovala sumu 4500 Kč. Do této přestavby nebyly započítávány režijní náklady, které u 3D tisku činí hodnotu koeficientu 1,37 a cena za práci na obráběcím centru se účtuje za jednu hodinu jeden tisíc korun.

LITERATURA

- [1] CHUA, Chee Kai., Kah Fai. LEONG a Chu Sing. LIM. *Rapid prototyping: principles and applications*. 2nd ed. New Jersey: World Scientific, c2003. ISBN 9812381201.
- [2] Forum Process Industry, A closer look at Solidworks' five favourite tools for Engineers, [online] [cit. 27.2.2017], Dostupné z: <http://www.processindustryforum.com/article/closer-look-solidworks-five-favourite-tools-engineers>
- [3] HRONČOK, Miroslav, Linux EXPRES, 3D tiskárny RepRap, 2013, [online] [cit. 27.2.2017], Dostupné z: <https://www.linuxexpres.cz/hardware/3d-tisk>
- [4] RepRap, 2017, [online] [cit. 27.2.2017], Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/RepRap>
- [5] RepRap.org, Huxley, 2015 [online] [cit. 27.2.2017], Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Huxley>
- [6] CAPING, Prezident and CEO Blog, 2015, [online] [cit. 27.2.2017], Dostupné z: <http://danaseero.capinc.com/bid/267923/The-Maker-s-Movement-and-3D-Printing>
- [7] RepRap.org, RepRapOneDarwin, 2015, [online] [cit. 27.2.2017], Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/RepRapOneDarwin>
- [8] Deltaprinter, 2013, [online] [cit. 5.3.2017], Dostupné z: <http://deltaprinter.webnode.cz/>
- [9] Pinterest, Celosvětový katalog nápadů, [online] [cit. 8.5.2017], Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/556053885221162100/>
- [10] CURAN, Chris, VINOD, Boya. pwc, The road ahead for 3D printing, 2016, [online] [cit. 5.3.2017], Dostupné z: <http://www.pwc.com/us/en/technology-forecast/2014/3d-printing/features/future-3d-printing.html>
- [11] RepRap, RepRap/cs, 2016, [online] [cit. 5.3.2017], Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/RepRap/cs>

- [12] MOYER, Ilan. Core (X, Y), Principle of Operation, 2012, [online],
[cit. 5.3.2017], Dostupné z: <http://corexy.com/theory.html>
- [13] Build A 3D Printer, Why a Delta?, 2017, [online] [cit. 5.3.2017],
Dostupné z: <http://builda3dprinter.eu/information/why-a-delta>
- [14] BULENT, Jusuf. All3DP, 3D Printers Explained: Delta, Cartesian, Polar, Scara, 2015, [online] [cit. 5.3.2017], Dostupné z: <https://all3dp.com/know-your-fdm-3d-printers-cartesian-delta-polar-and-scara/>
- [15] All3DP, 3D Printer, 2016, [online] [cit. 5.3.2017],
Dostupné z: <http://deltapubliclibrary.org/3d-printer>
- [16] All3DP, [online] [cit. 14.4.2017],
Dostupné z: <http://www.robotdigg.com/product/929/Scara-Arm-3d-Printer>
- [17] HOFFMAN, Tony. PC, How to Buy a 3D Printer, 2015, [online] [cit. 13.3.2017],
Dostupné z: <http://www.pcmag.com/article2/0,2817,2483632,00.asp>
- [18] 3DPrinterPrices, Best 3D Printer Extruder in 2017, 2017, [online] [cit. 13.3.2017],
Dostupné z: <http://www.3dprinterprices.net/best-3d-printer-extruder/>
- [19] BRUCE, 3D Printing Systems, How does the UP 3D printer's print head (Extruder) work? 2014, [online] [cit. 13.3.2017], Dostupné z:
<https://3dprintingsystems.freshdesk.com/support/solutions/articles/4000003132-how-does-the-up-3d-printer-s-print-head-extruder-work->
- [20] MatterHackers, Extruders 101: A crash course on an essential component of your 3D printer, 2017, [online] [cit. 21.3.2017], Dostupné z:
<http://www.matterhackers.com/articles/extruders-101-a-crash-course-on-an-essential-component-of-your-3d-printer>
- [21] E3D-ONLINE, Volcano, 2014, [online] [cit. 21.3.2017],
Dostupné z: <http://e3d-online.com/E3D-v6/Volcano?limit=100>
- [22] SLINTÁK, Vlastimil. μ Art.cz, Elektronika pro RepRap, 2013, [online]
[cit. 13.3.2017], Dostupné z: <http://uart.cz/1303/elektronika-pro-reprap/>
- [23] Arduino, 2017, [online] [cit. 30.3.2017],
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Arduino>

- [24] Solid Utopia, Marlin firmware user guide for beginners, 2017, [online]
[cit. 30.3.2017], Dostupné z: <http://solidutopia.com/marlin-firmware-user-guide-basic>
- [25] E3D-ONLINE, E3D-v6, 2014, [online] [cit. 21.4.2017],
Dostupné z: <http://e3d-online.com/E3D-v6>
- [26] RepRap, Diamont Hotend, 2017, [online] [cit. 31.3.2017],
Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Diamond_Hotend
- [27] GOVER, Francis, NEW ATLAS, Electronic, 2015, [online] [cit. 31.3.2017],
Dostupné z: <http://newatlas.com/diamondhotend-color-3d-printer-extruder/36950/>
- [28] PROUZA, Tomáš. *Návrh duální tiskové hlavy pro FDM 3D tiskárnu* [online].
Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016 [cit. 24.4.2017].
Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/60527>. Diplomová práce. Vysoké učení
technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie.
Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
- [29] BENCHOFF, Brian. HACKADAY, 2016, [online] [cit. 1.5.2017],
Dostupné z: <http://hackaday.com/2016/09/28/prusa-releases-4-extruder-upgrade/>
- [30] WATKIN, Hannah, All3DP, 2016, [online] [cit. 1.5.2017],
Dostupné z: <https://all3dp.com/prusa-i3-multi-material-upgrade/>
- [31] BENCHOFF, Brian. HACKADAY, 2016, [online] [cit. 3.5.2017],
Dostupné z: <http://hackaday.com/2016/10/03/maker-faire-multicolor-and-multi-material-3d-printing/>
- [32] E3D-ONLINE, The Kraken, 2014, [online] [cit. 21.4.2017],
Dostupné z: <https://e3d-online.com/The-Kraken>
- [33] E3D-ONLINE, Chimera, 2014, [online] [cit. 17.4.2017],
Dostupné z: <http://e3d-online.com/Chimera>
- [34] ebay, Geeetech GT9L Bowden extruder J-head V2.0 cooling fan & PTFE tubing
Prusa Mendel, [online] [cit. 24.4.2017], Dostupné z:
<http://www.ebay.com/itm/Geeetech-GT9L-Bowden-extruder-J-head-V2-0-cooling-fan-amp-PTFE-tubing-Prusa-Mendel-/191221079191>

- [35] Rebel 3D, Návod na stavbu tiskárny REBEL II, [online] [cit. 27.2.2017],
Dostupné z: http://www.rebelove.org/download/navod_rebel_ii_051.pdf
- [36] CAD CZ, 3D tiskárny od Futur3D si můžete sestavit doma 2014, [online]
[cit. 2.3.2017], Dostupné z: <https://www.cad.cz/aktuality/77-aktuality/4932-3d-tiskarny-si-uz-muzete-sestavit-i-doma-futur3d.html>
- [37] ŠÁFR, Jan. *Návrh 3D tiskárny technologie FDM*. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2016 [cit. 10.1.2017], Diplomová práce, Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra Výrobních systémů a automatizace, Vedoucí práce Ing. Petr Keller, Ph.D.
- [38] MATERIALPRO 3D, ABS, 2017, [online] [cit. 28.3.2017],
Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>
- [39] MICROCON, Technické parametry krokového motoru SX17-1005LQCEF
[online] [cit. 29.3.2017], Dostupné z: <http://www.krokovemotory.cz/SX17-1005LQCEFds.pdf>
- [40] POSTAV ROBOTA, Modelářské 55g servo 11kg/cm MG996R, [online]
[cit. 30.4.2017], Dostupné z: <https://www.postavrobota.cz/Modelarske-55g-servo-11kg-cm-MG996R-d234.htm>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Schéma technologie Fused Deposition Modeling [2].....	13
Obr. 2. RepRap 1.0 Darwin [7].....	15
Obr. 3. Hobby 3D tiskárna Rebel II [9]	16
Obr. 4. Profesionální 3D tiskárna Stratasys J750	17
Obr. 5. Schéma 3D tiskárny kartézského typu [10]	18
Obr. 6. Schéma os na 3D tiskárně CoreXY [12].....	18
Obr. 7. Schéma 3D tiskárny typu Delta [10]	19
Obr. 8. Polární 3D tiskárna od společnosti POLAR3D [15].....	20
Obr. 9. SCARA 3D tiskárna od společnosti ROBOTDIGG [16]	20
Obr. 10. Schéma tiskové hlavy [19].....	22
Obr. 11. Ozubené (hnací) kolo podávacího mechanismu [20]	23
Obr. 12. Model E3D [25].....	27
Obr. 13. Model Diamond nozzle [26].....	28
Obr. 14. Model Cyclops [28]	29
Obr. 15. Prussia i3 MK2 Multi-Material Upgrade [31]	30
Obr. 16. Model Kraken [32]	31
Obr. 17. Model Chimera [33]	31
Obr. 18. Přímý extruder LulzBot [20]	34
Obr. 19. Bowden extruder Geeetech GT9L [34]	35
Obr. 20. Popis 3D tiskárny Rebel II.....	36
Obr. 21. Popis tiskové hlavy	38
Obr. 22. Levý dolní úchyt.....	39
Obr. 23. Pravý dolní úchyt	39
Obr. 24. Levý pojezd Z.....	39
Obr. 25. Pravý pojezd Z.....	39
Obr. 26. Levý horní úchyt	39

Obr. 27. Pravý horní úchyt	39
Obr. 28. Skica návrhu	41
Obr. 29. Návrh tiskové hlavy v softwaru CATIA V5R21	43
Obr. 30. 3D tiskárna Dimension SST 768	44
Obr. 32. 3D tisk vyrovnávací podložky	45
Obr. 33. 3D tisk základní desky a kyvadla	46
Obr. 34. MAZAK Integrex 100- IV	46
Obr. 35. Průběh obrábění chladiče	47
Obr. 36. Tisková hlava - varianta 1.1	48
Obr. 37. Tisková hlava - varianta 1.2	50
Obr. 38. CAD model varianty 2.1	51
Obr. 39. Tisková hlava - varianta 2.1 s připojením na řídicí desku Arduino	53
Obr. 41. CAD model varianty 2.2	55
Obr. 42. Tisková hlava - varianta 2.2	56
Obr. 43. CAD model varianty 2.3 – přední pohled	57
Obr. 44. CAD model varianty 2.3 – zadní pohled	57
Obr. 45. Fortus 450mc	58
Obr. 46. Vytisknuté díly	58
Obr. 47. Vložka v hliníkovém profilu	60
Obr. 48. Vložka se šroubem	60
Obr. 49. Úchyty pro pojezdové tyče a trapézové šrouby - 1. horní levý úchyt, 2. horní pravý úchyt, 3. dolní levý úchyt, 4. dolní pravý úchyt a 5. poklička	61
Obr. 50. Levý a pravý pojezd Z	61
Obr. 51. Tisková hlava pro dva materiály	62
Obr. 52. 1. přední úchyt pro energetický řetěz, 2. zadní úchyt pro energetický řetěz a 3. držák pro napájení servomotoru	63
Obr. 53. Zapojení elektroniky do řídicí desky RAMPS	64
Obr. 54. Model krytu zdroje	64

Obr. 55. Kryt zdroje	65
Obr. 56. Optimalizovaná 3D tiskárna Rebel II	66
Obr. 57. Repetier-Host.....	69

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Porovnání tiskových hlav se základními parametry [33]	32
Tab. 2. Seznam použitých komponentů v 3D tiskárně Rebel II	37
Tab. 3. Vlastnosti tiskového materiálu ABS [38]	44
Tab. 4. Technické parametry krokového motoru X17-1005 [39]	48
Tab. 5. Technické parametry servomotoru MG996R [40]	54

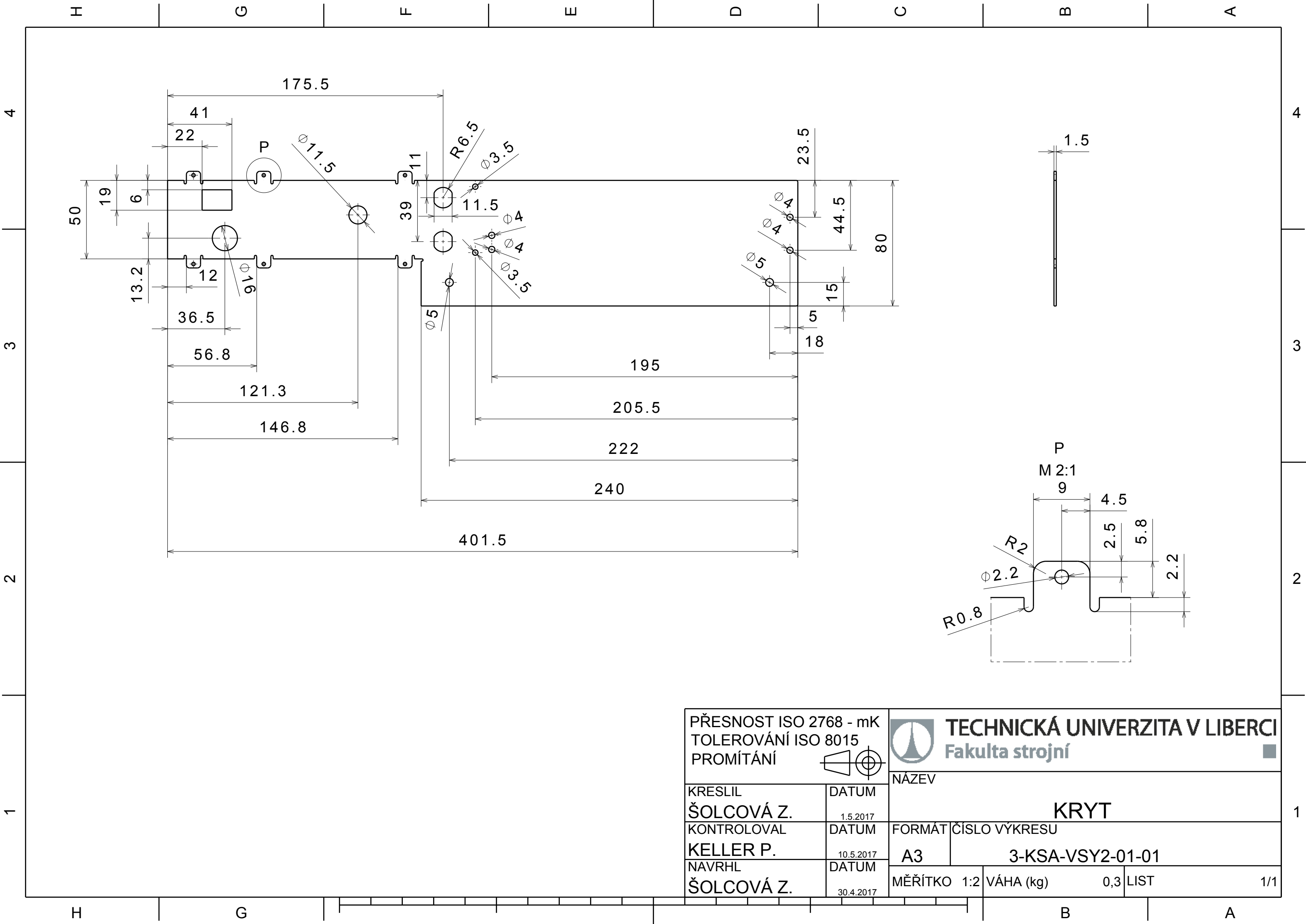
SEZNAM PŘÍLOH

Výkresy

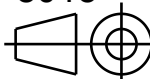
CD:

CAD a STL data

Firmware Repetier



PŘESNOST ISO 2768 - mK
TOLEROVÁNÍ ISO 8015
PROMÍTÁNÍ



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

KRESLIL
ŠOLCOVÁ Z.
KONTOLOVAL
KELLER P.
NAVRHL
ŠOLCOVÁ Z.

DATUM
1.5.2017
DATUM
10.5.2017
DATUM
30.4.2017

NÁZEV

KRYT

FORMÁT ČÍSLO VÝKRESU

A3

3-KSA-VSY2-01-01

MĚŘÍTKO

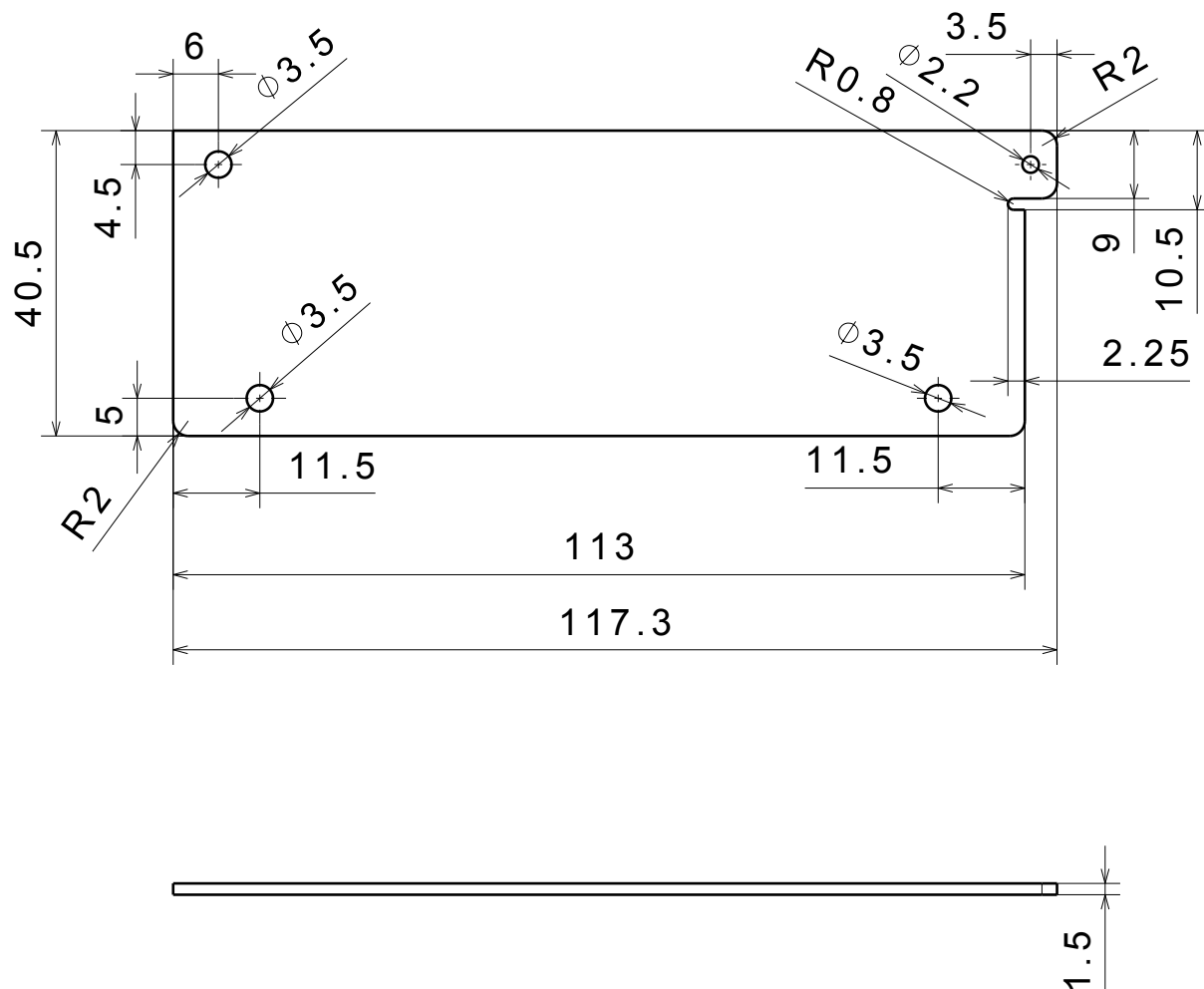
1:2

VÁHA (kg)

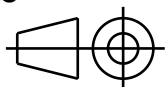
0,3

LIST

1/1



PŘESNOST ISO 2768 - mK
TOLEROVÁNÍ 8015
PROMÍTÁNÍ



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

NÁZEV

KRESLIL
ŠOLCOVÁ Z.

DATUM
1.5.2017

BOČNÍ KRYT LEVÝ

KONTOLOVAL
KELLER P.

DATUM
10.5.2017

FORMÁT ČÍSLO VÝKRESU

A4

4-KSA-VSY2-01-02

NAVRHL
ŠOLCOVÁ Z.

DATUM
30.4.2017

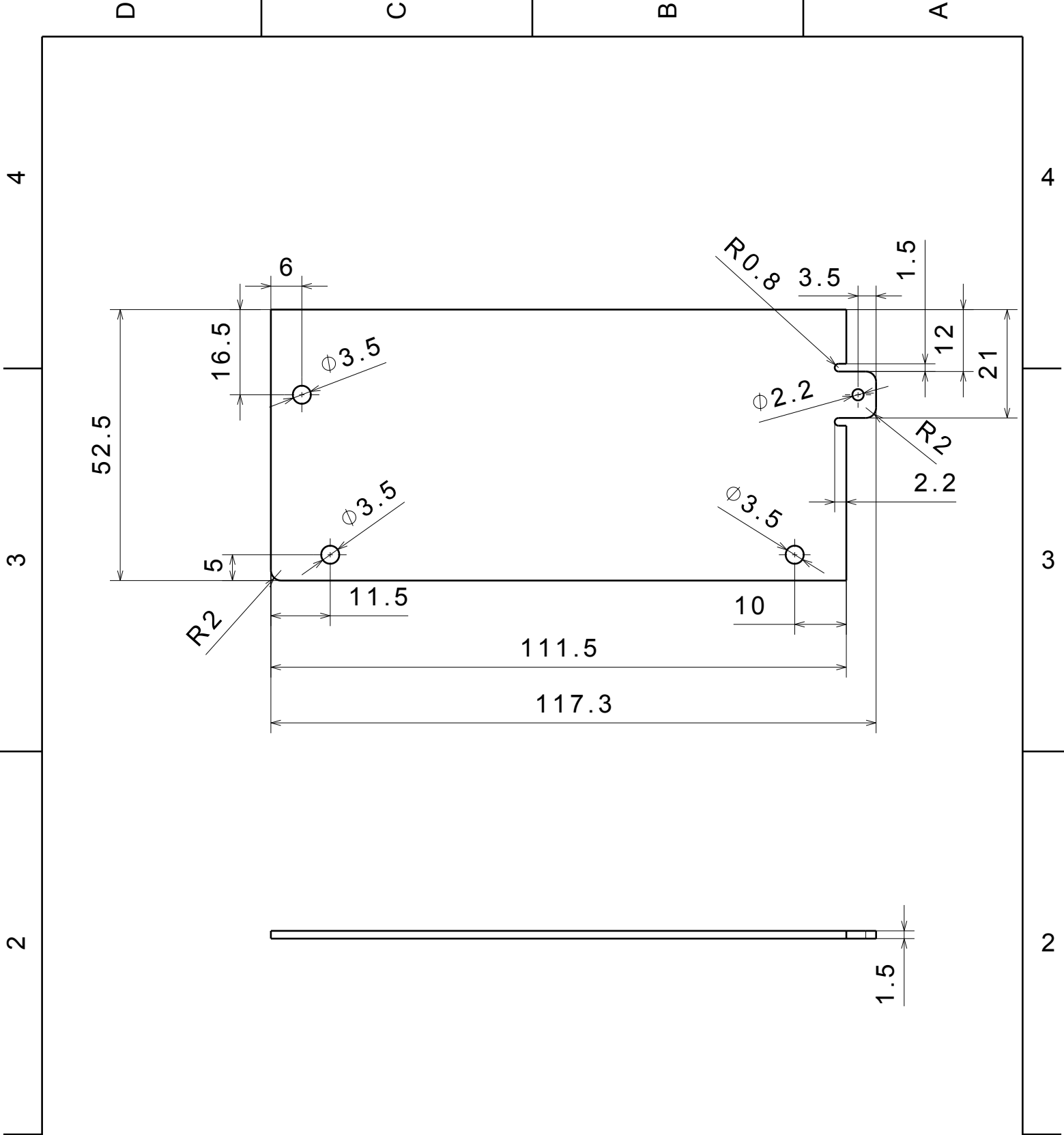
MĚŘÍTKO 1:1

VÁHA (kg)

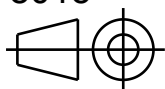
0,01

LIST

1/1



PŘESNOST ISO 2768 - mK
TOLEROVÁNÍ ISO 8015
PROMÍTÁNÍ



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

NÁZEV

KRESLIL
ŠOLCOVÁ Z.

DATUM
1.5.2017

BOČNÍ KRYT PRAVÝ

KONTOLOVAL
KELLER P.

DATUM
10.5.2017

FORMÁT
A4

ČÍSLO VÝKRESU

4-KSA-VSY2-01-03

NAVRHL
ŠOLCOVÁ Z.

DATUM
30.4.2017

MĚŘÍTKO 1:1

VÁHA (kg)

0,01

LIST

1/1

D

A